

В. К. ПОПОВ

ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МОСКВА

ЛЕНИНГРАД

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
118	2 сверху	и табл. IV	и табл. на стр. 116	Авт.
229	17 сверху	в гл. XI.	в гл. X.	"
287	6 снизу	(п. 12).	(п. 9).	"
363	8 снизу	как уже отмечено выше	Меха-	Ред.
476	1 снизу	(п. 34), меха-	t =	Авт.
539	19 сверху	в п. 59	в п. 66	"
552	Фиг. 312, левая сторона	M приемника	M передатчика	Ред.
567	23 сверху	M передатчика (п. 65)	M приемника (п. 66)	Авт.

ПОДПИСАНО

Проф. В. К. ПОПОВ
Доктор технических наук

ДЕП

1938 - №

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Допущено Всесоюзным комитетом по делам высшей школы при СНК СССР в качестве учебника для энергетических вузов и электротехнических специальностей

7/305338

15.02.2007

ПОДПИСАНО



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1945 ЛЕНИНГРАД

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

Учебник по курсу электропривода для студентов энергетических и электротехнических втузов.

Материал книги распределен по одиннадцати главам, в которых рассматриваются: общие сведения по электроприводу, выбор мощности электродвигателей, основы динамики электропривода, механические характеристики электродвигателей, переходные режимы и нагрузочные диаграммы электропривода, регулировочные свойства электродвигателей, синхронизация хода и поддержание скорости, выбор рода тока для электропривода и выбор типа двигателя. В книге отражены последние достижения в области электропривода как в СССР, так и за границей.

Книга представляет интерес и для инженерно-технических работников, занятых применением электродвигателей в промышленных предприятиях.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга предназначена служить в качестве учебника по электроприводу для студентов специальности «Электрооборудование промышленных предприятий». Составлена она в полном соответствии с программой соответствующего курса, утвержденной ВКВШ. Понятно, специфика того или другого вуза и существующей в нем научной школы накладывает ряд особенностей как на общий характер изложения материала, так иногда и на последовательность изложения отдельных вопросов. В этом отношении автор придерживался методики, существующей в Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина, в котором он ведет соответствующую кафедру и специализацию с 1930 г.

Совершенно естественно, что в выпускаемом учебнике автор использовал частично материал, а также общий характер изложения, принятый им в выпущенном ранее (в 1932—1939 гг.) учебном пособии под названием «Применение двигателей в промышленности» в трех томах. В этом отношении данный учебник до некоторой степени является обновленным, улучшенным и приспособленным в качестве учебника преемником указанного труда.

В силу необходимости составления учебника в строго фиксированном объеме ряд вопросов, главным образом технико-экономического порядка, изложены значительно более кратко. В силу наличия у нас в настоящее время большого числа прейскурантов по электрооборудованию в книге отсутствуют соответствующие табличные данные справочного характера. В свою очередь материал обновлен целым рядом новых данных из теории электропривода на основе работ, проведенных за последние годы у нас в СССР.

Та же ограниченность объема вызвала необходимость отказа от примерных расчетов. Автор дал их лишь в одном, двух случаях, где это было по его мнению совершенно необходимо. Расчетные задачи решаются студентами на упражнениях, на основе имеющихся в настоящее время задачник: Фатеева и Норневского (ЛЭТИ), Бегашева и Дранникова (ЛПИ), где для ряда примеров даны решения. Точно так же в данный курс не входят вопросы лабораторного исследования. Они должны освещаться в отдельном пособии.

Учитывая, что в «Применении двигателей в промышленности» была дана подробная библиография всей основной литературы, опубликованной к тому времени, автор для данного учебника ограничился преимущественно ссылками на расширяющие кругозор учащегося новые статьи, а из старых указывались только наиболее необходимые. По условиям баланса времени для курса и объема и характера учебника ионно-электронный привод рассмотрен кратко, лишь в своих элементарных основах.

Автор сознательно пошел на отказ от освещения некоторых сложных вопросов, имеющих практическое значение для сравнительно ограниченного круга лиц (переходные режимы синхронных и коллекторных двигателей переменного тока, работа синхронного двигателя при пульсирующей нагрузке, теория следящего привода, теория работы электропривода с регуляторами). Исходя из задач современного электропривода, автор считал возможным исключить из курса вопросы улучшения $\cos \varphi$, уже богато освещенные в нашей литературе и мало связанные по существу со структурой данного курса.

Автор стремился построить учебник так, как ему казалось наиболее рациональным на основе своего опыта во вузе и в промышленности и на основе опыта всей кафедры промышленного использования электрической энергии ЛПИ.

Некоторые трудности построения учебника по электроприводу из-за необходимости дать синтез соответствующих вопросов из всех главнейших отраслей промышленности, разнообразие материала, его обширность при некоторой ограниченности курса и объема книги делают неизбежным наличие в нем тех или других недостатков.

Автор будет весьма признателен всем лицам, которые возьмут на себя труд сообщить ему свои замечания и пожелания в целях дальнейшего улучшения учебника в заданном объеме.

Проф. В. К. Попов

Ленинград, Сосновка

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие	3
-----------------------	---

Глава I

Общие сведения

1. Краткая история развития электропривода за границей и в СССР	11
2. Определение понятия „электропривод“	26
3. Основные задачи проектирования и эксплуатации электропривода	28

Глава II

Выбор мощности электродвигателей с точки зрения допустимого нагрева и мгновенных перегрузок

4. Общий подход к выбору мощности двигателей	33
5. Факторы, определяющие номинальную и перегрузочную мощность электрической машины	34
6. Нагревание двигателей при длительной неизменной нагрузке	43
7. Значение постоянных времени нагрева для вращающихся и неподвижных машин	49
8. Изменение температуры двигателя при различных длительных нагрузках	50
9. Охлаждение машины при отсутствии нагрузки и изменение температуры машины при любой нагрузке	53
10. Возможные режимы работы исполнительных механизмов и электропривода и основная классификация этих режимов на базе длительности нагрузки	58
11. Выбор мощности двигателя при продолжительной неизменной или весьма мало меняющейся нагрузке	60
12. Принципиальное обоснование выбора мощности двигателя для любого переменного режима работы	62
13. Метод эквивалентного тока и эквивалентного момента	67
14. Метод выбора мощности двигателя для переменного режима работы по средним потерям	80
15. Выбор мощности двигателя для кратковременной нагрузки	82
16. Особенности работы двигателей при повторно-кратковременной нагрузке	86
17. Пересчет мощности двигателей повторно-кратковременного режима от одной продолжительности включения к другой	92
18. Практический выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы	94

Глава III

Основы динамики электропривода

19. Значение динамики в теории электропривода	106
20. Уравнения движения электропривода в случае вращательных движений элементов электрифицированного агрегата	107

	<i>Стр.</i>
21. Приведение статических моментов	113
22. Приведение маховых масс вращательного движения к одной оси	114
23. Приведение поступательного движения к вращательному и обратно	120
24. Практические способы учета потерь в передачах при приведении динамических и статических моментов	123
25. Определение приведенных усилий и приведенных маховых моментов в механизмах с кривошипной передачей	136
26. Время пуска и торможения электропривода и пройденный за это время органами рабочей машины путь	141
27. Потери энергии при пуске в ход электропривода с двигателями постоянного тока и асинхронными	144
28. Влияние выбора номинальной скорости двигателя на его маховой момент и потери при пуске	148
29. Предварительный выбор наиболее выгодного передаточного числа между двигателем и исполнительным механизмом и практическое значение этого вопроса	150

Глава IV

Механические характеристики электродвигателей

30. Общие замечания	156
31. Основные соображения о применении к расчету механических характеристик относительных величин	158
32. Механические характеристики шунтового двигателя постоянного тока	162
33. Механические характеристики шунтового двигателя при шунтированном якоре и последовательном сопротивлении	174
34. Механические характеристики серийных двигателей постоянного тока	180
35. Расчет механических характеристик серийного двигателя в нормальной схеме	184
36. Механические характеристики серийного двигателя в сложных схемах с шунтировкой якора и обмотки возбуждения	188
37. Составление комбинации механических характеристик схем управления электроприводом	197
38. Механические характеристики компаундных двигателей постоянного тока	198
39. Механические характеристики асинхронных двигателей	200
40. Торможение асинхронных двигателей	213
41. Специальные способы торможения асинхронных двигателей с кольцами	222
42. Механические характеристики синхронных двигателей	227
43. Механические характеристики коллекторных двигателей переменного тока	231
44. Торможение коллекторных двигателей переменного тока	241

Глава V

Переходные режимы и нагрузочные диаграммы электропривода

45. Практическое значение изучения переходных режимов и нагрузочных диаграмм электроприводов	248
46. Характер статического момента различных исполнительных механизмов	250
47. Основные понятия об устойчивости электрифицированных агрегатов	256
48. Обобщенная классификация нагрузочных диаграмм и переходных режимов	260
49. Механические переходные режимы электропривода с шунтовой характеристикой при постоянном статическом моменте	269
50. Решение уравнения движения электропривода с шунтовой характеристикой в относительных единицах	273

	<i>Стр.</i>
51. Приложение полученных решений к пусковому режиму электропривода с двигателем с шунтовой характеристикой	274
52. Тормозные режимы электропривода с шунтовой характеристикой при $M_m = \text{const}$	277
53. Краткие соображения по определению мощности электропривода с шунтовой характеристикой при включении в цикл работы пуска, установившейся скорости, торможения и паузы	284
54. Переходные режимы двигателя с шунтовой характеристикой при пиковой нагрузке на примере нереверсивного прокатного стана	286
55. Краткие соображения о работе маховых масс в приводе с пиковой нагрузкой	294
56. Система Ильгнера	299
57. Нагрузочные диаграммы электроприводов шахтного подъемника с уравновешенным канатом и особенности диаграмм строгального станка и реверсивного прокатного стана	304
58. Численный пример расчета мощности двигателя для шахтного подъемника с уравновешенным канатом (шкив Кёпе)	312
59. Механические переходные режимы электроприводов с шунтовой характеристикой при статическом моменте, зависящем от скорости	318
60. Основные методы графического и графо-аналитического интегрирования уравнений движения привода. Принципы пропорций	322
61. Расчет продолжительности пуска шунтового двигателя под пусковым реостатом на примере центрифуги	328
62. Переходные режимы и нагрузочные диаграммы электропривода с шунтовой характеристикой при статическом моменте, зависящем от пути	330
63. Переходные режимы и нагрузочные диаграммы электропривода с шунтовой характеристикой при статическом моменте, зависящем от времени	340
64. Электромеханические переходные режимы в шунтовых двигателях постоянного тока при $M_m = \text{const}$	345
65. Простейшие методы определения коэффициента самондукции обмотки явора машин постоянного тока	353
66. Мгновенное падение скорости шунтового двигателя при ударной нагрузке и способы его устранения	355
67. Механические переходные режимы в электроприводе с серийными и командными двигателями постоянного тока при $M_m = \text{const}$ и $M_m = f(n)$	363
68. Механические переходные режимы электропривода с серийными двигателями при $M_m = f(L)$	374
69. Особенности расчета нагрузочных диаграмм и переходных режимов при переменном маховом моменте	375
70. Нагрузочная диаграмма электропривода с серийным двигателем для $M_m = f(L)$ на примере ножниц с пуском для каждого раза	378
71. Нагрузочные диаграммы электропривода при $M_m = f(v, L)$	382
72. Графо-аналитические методы решения уравнений электромеханических переходных режимов в приводах с двигателями постоянного тока	383
73. Общие соображения о переходных режимах электроприводов с асинхронными двигателями	382
74. Аналитическое рассмотрение пускового режима и режима противовключения короткозамкнутого двигателя при $M_m = \text{const}$ в случае использования упрощенного уравнения Кюсса	396
75. Аналитическое рассмотрение пускового режима и режима противовключения короткозамкнутого двигателя при $M_m = \text{const}$ в случае использования упрощенного уравнения Кюсса (в относительных единицах)	401
76. Аналитическое рассмотрение пускового режима и режима противовключения короткозамкнутого двигателя при $M_m = \text{const}$ в случае использования полного уравнения Кюсса (в относительных единицах)	404

	<i>Стр.</i>
77. Определение потерь в цепи ротора и статора короткозамкнутого двигателя при пуске и торможении противовключением	408
78. Динамическое торможение электроприводов с асинхронными двигателями	411
79. Особенности рекуперативного торможения в обыкновенных и многоскоростных короткозамкнутых двигателях и краткое сопоставление разных методов торможения	413
80. Выбор рационального номинального скольжения короткозамкнутых двигателей в электроприводах с пульсирующей нагрузкой	417
81. Допустимое число включений в час короткозамкнутых двигателей при повторно-кратковременном режиме работы	419
82. Особенности переходных режимов электроприводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями при переменной частоте	422
83. О динамической устойчивости асинхронного двигателя при ударной нагрузке	425
84. О переходных режимах электроприводов с синхронными двигателями	425
85. О нагрузочной диаграмме синхронного двигателя при пульсирующей нагрузке	429
86. О динамической устойчивости синхронного двигателя при ударной нагрузке	429

Глава VI

Регулировочные свойства электродвигателей постоянного тока

87. Значение вопроса о регулировке скорости исполнительных механизмов для современной техники и некоторые определения	432
88. Особенности выбора мощности двигателей для исполнительных механизмов с регулируемой скоростью	434
89. Различный характер изменения момента и мощности исполнительных механизмов при регулировке скорости и соответствующие свойства для эквивалентных величин некоторых типов электродвигателей	436
90. Способы регулирования скорости двигателей постоянного тока	440
91. Регулирование скорости шунтовых двигателей изменением тока возбуждения	440
92. Регулирование скорости сопротивлением в цепи якоря двигателей постоянного тока и комбинированная регулировка в шунте и в якоре для шунтовых двигателей	443
93. Последовательно-параллельное включение двигателей в сеть	444
94. Регулирование скорости двигателей постоянного тока при многопроводной системе	446
95. Регулирование скорости двигателей постоянного тока по системе Леонарда	446
96. Система Леонарда с трехобмоточным генератором	454
97. Способы компенсации влияния остаточного магнетизма и омического падения напряжения в системе Леонарда	458
98. Необходимость и способы быстрого возбуждения генератора Леонарда	459
99. Переходные режимы в системе Леонарда	462
100. Графо-аналитические методы расчета переходных режимов в системе Леонарда	475
101. Система согласия-встречного включения	480
102. Регулирование скорости двигателей постоянного тока ионно-электронными аппаратами	482
103. Краткое сопоставление различных систем регулирования скорости двигателей постоянного тока и пределы их применимости	492

Глава VII

Стр.

Регулировочные свойства электродвигателей переменного тока

104. Общие замечания	495
105. Регулирование скорости асинхронного двигателя посредством сопро- тивления в цепи ротора	496
106. Регулирование скорости асинхронных двигателей переключением чис- ла пар полюсов	497
107. Регулирование скорости асинхронных двигателей изменением частоты	501
108. Некоторые специальные типы асинхронных двигателей со ступенча- той регулировкой, двигатели повышенной частоты, дуговой статор .	503
109. Краткие соображения о пределах регулирования и пределах приме- нимости коллекторных двигателей переменного тока	507
110. Области применения каскадных установок асинхронных машин с кол- лекторными, принцип их работы и главнейшие типы	511
111. Регулирование по системе Кремера	520
112. Регулирование по системе Шербиуса	526
113. Сравнение систем Кремера и Шербиуса	534
114. Перспективы применения каскадных установок	536

Глава VIII

Синхронизация хода, поддержание постоянства скорости и некоторые
другие функции электроприводов

115. Практическое значение вопроса о синхронизации хода и поддержа- нии постоянства скорости и возможные способы решения задачи .	537
116. Механическое выравнивание хода отдельных двигателей и особен- ности работы двигателей при этой связи	541
117. Основные понятия о синхронной связи	544
118. Синхронизация двигателей постоянного тока без вспомогательных машин	546
119. Применение вспомогательных трехфазных и однофазных синхронных и асинхронных машин для синхронизации двигателей постоянного тока и асинхронных (системы с самосинами)	547
120. Синхронизация асинхронных двигателей путем электрической связи роторов через реостат	556
121. О синхронизации шунтовых коллекторных двигателей переменного тока типа Шраге	565
122. Основные способы поддержания постоянства скорости двигателей при многодвигательном приводе	566
123. Некоторые особенности системы Леонарда при широком диапазоне регулировки скорости с использованием подрегулировки скорости двигателя током возбуждения	567
124. Поддержание постоянства скорости двигателей постоянного тока по- средством быстродействующих регуляторов	570
125. Поддержание постоянства скорости посредством трехфазных реактив- ных дифференциалов	574
126. Система поддержания постоянства скорости с самосинами и уголь- ным регулятором	576
127. Поддержание постоянства скорости двигателей посредством ионно- электронных аппаратов	578
128. Возможности использования амплитуды	583
129. О некоторых других типичных функциях электроприводов	535
130. Понятие о следящем приводе	587
131. Следящий привод с электромагнитными и гидравлическими муфтами	590
132. О точной остановке электроприводов	593

Глава IX

Стр.

Выбор рода тока для промышленных электроприводов

133. Значение вопроса о выборе рода тока и выборе рода тока для нерегулируемых установок	595
134. Краткие соображения о технико-экономических пределах применимости различных систем регулируемого электропривода	599
135. Ориентировочные указания по выбору рода тока для электроприводов в различных отраслях промышленности	602

Глава X

Выбор нерегулируемого типа двигателя переменного тока

136. Постановка задачи	605
137. Краткая характеристика современных типов короткозамкнутых двигателей	607
138. Краткие сведения о пусковых свойствах синхронного двигателя	615
139. Классификация пусковых схем для асинхронного пуска синхронных двигателей	619
140. Пуск синхронных двигателей через реактор или автотрансформатор и их сравнение	621
141. Схема Корндорфера	628
142. Пуск синхронного двигателя по методу Хиббарда, пуск через емкость и сопротивление, пуск с разомкнутой обмоткой возбуждения и приключенным возбудителем	625
143. Выбор предельной допустимой в установке мощности короткозамкнутого и синхронного двигателей	629
144. Рациональный выбор нерегулируемого типа двигателя переменного тока при мощности примерно до 100 kW	630
145. Рациональный выбор нерегулируемого типа двигателя переменного тока при мощности свыше 100 kW	633

Глава XI

Выбор конструктивного типа двигателя с точки зрения защиты его от окружающей среды и окружающей среды от него

146. Общие замечания	637
147. Классификация способов защиты промышленных двигателей от окружающей среды по нормам СССР и иностранным	640
148. Общие основы выбора способа защиты двигателей от окружающей среды в разных отраслях промышленности	642
149. Защита двигателей во взрывоопасной среде	648
150. Основные указания по практическому выбору конструктивного способа защиты двигателей	650
Главнейшие условные обозначения	656
Сокращенные обозначения журналов и фирм	659
Список основной литературы по электроприводу	659
Алфавитный указатель	668

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

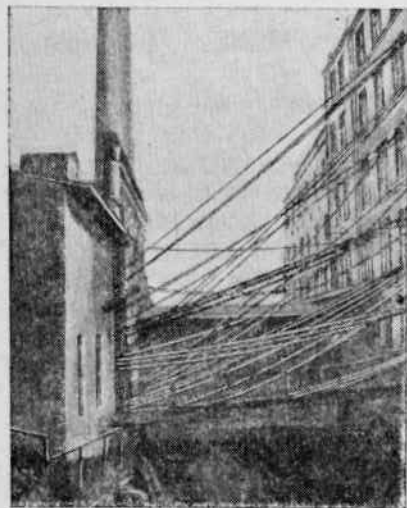
1. Краткая история развития электропривода за границей и в СССР

Высокая производительность промышленных предприятий при небольшой стоимости продукции возможна лишь при механическом, а не ручном приводе исполнительных механизмов. Непосредственное применение физических усилий человека, обуславливая исключительно тяжелые условия труда, обходилось бы чрезвычайно дорого. Работа одного человека в течение одного рабочего дня эквивалентна примерно 1 кВт·ч, стоящему при получении электрической энергии от гидростанции всего несколько копеек. Поэтому совершенно естественно, что мы имеем исключительно сильно развивающуюся механизацию и автоматизацию производственных процессов.

Роль человека все больше и больше сводится лишь к планированию и управлению исполнительными механизмами. Число механизмов, приходящихся на долю управления одного рабочего, непрерывно повышается. Стахановское движение опрокинуло старые нормы и в огромной степени повысило производительность труда. Развивающееся у нас многостаночное обслуживание является одним из важнейших путей в этом направлении.

Появление несколько столетий тому назад первых механических двигателей—паровых машин и водяных двигателей—дало в свое время возможность создать производственные механизмы различных отраслей промышленности, пригодные только для механического привода. При паровых машинах и водяных двигателях совершенно естественным, а во многих случаях и исключительно возможным типом привода рабочих машин был чисто трансмиссионный. Каждая фабрика или завод строили собственную тепловую станцию с паровыми котлами и машинами или гидравлическую с водяными колесами. Преимущества централизованного производства энергии тогда еще не были осознаны, да и не могли быть использованы как в силу недостаточного уровня техники того времени, так и в силу того, что электротехника находилась в младенческом состоянии. При этом все рабочие машины какой-либо фабрики или цеха приводились в движение от одного механического двигателя.

Одиночный привод исполнительных механизмов небольшой мощности от мелких паровых машин был почти невозможен из-за трудностей распределения пара и высокой стоимости небольших паровых машин. Поэтому распределение энергии по фабрикам и заводам производилось исключительно механическим путем—посредством ременных и канатных передач. Наиболее характерным примером такой передачи энергии служила пятиэтажная текстильная фабрика (фиг. 1). В отдельном помещении располагалась котельная с паровой машиной. С барабана, сочлененного с этой машиной, энергия передавалась канатами к главным трансмиссиям каждого этажа, откуда она распределялась посредством ременных передач.



Фиг. 1. Старый тип привода текстильной фабрики.

Первое применение электропривода имело место вообще не в промышленности, а на транспорте. 13 сентября 1838 г., вскоре после возникновения у Salvatore del Negro (1830 г.) идеи использования электромагнитной энергии для целей механической работы, в Петербурге академик Б. С. Якоби испытывал катер, оборудованный электродвигателем его системы с питанием от первичных элементов. Этот катер развивал на Неве максимальную скорость 2,5 км/ч. В 1839 г. при участии Ленца мощность подобного двигателя была доведена до 0,75 кВт, а скорость катера на Неве

до 4,2 км/ч. В 1838 г. был оборудован также электрический экипаж Давидсона с приводом от электродвигателя, питаемого опять-таки от гальванических элементов, для перевозки (вначале) одного человека. В 60-х годах прошлого столетия наметилось применение электродвигателей с аккумуляторами на подводных лодках, где условия подводного плавания исключали возможность использования паровых машин. Первая небольшая электрическая круговая железная дорога с аккумуляторным питанием двигателя была оборудована Сименсом в 1879 г. на Берлинской выставке.

Первая электрическая станция, построенная исключительно для осветительных целей, была открыта Эдисоном в Нью-Йорке в 1882 г. Применение электропривода в промышленности началось значительно позже, практически с 90-х годов прошлого столетия, почти со времени изобретения в 1891 г. Доливо-Добровольским асинхронного двигателя. Примерно в этих годах электропривод

постоянного тока и притом уже с полуавтоматическим управлением посредством контакторов и коммандо-контроллеров стал применяться на американских металлургических заводах.

Нужно сказать, что введение нового промежуточного звена между первичным двигателем и рабочей машиной—электродвигателя—вначале вызывало у многих недоумение вследствие удорожания оборудования, его усложнения и возникновения потерь энергии при передаче ее по проводам на значительные расстояния. Лишь исключительные трудности механического распределения энергии при большой протяженности мощных прокатных цехов и разбросанности в них отдельных механизмов стали побуждать к широкому применению в этих цехах электропривода. Аналогичные условия разбросанности буровых вышек тогда же привели к применению электропривода в нефтяной промышленности.

Появление разных типов электродвигателей и разработка вопросов передачи электрической энергии на расстояние немедленно оказали свое влияние на распределение энергии по промышленным предприятиям. Паровые машины и другие типы механических двигателей стали заменяться электродвигателями, а взамен передачи энергии посредством ремней стала применяться передача по проводам. Однако в условиях того времени было трудно быстро осознать преимущества электрического привода. Поскольку в этот период получение электрической энергии производилось на самой фабрике и заводе, владельцы и руководители предприятий предпочитали механическую передачу электрической, считая, что полная стоимость преобразования тепловой энергии в электрическую больше того выигрыша, который дает исчезновение трансмиссионных передач и потерь в них. Еще в 1920 г. мы находим в английских электротехнических журналах статьи, в которых доказывается целесообразность электрификации текстильных и других предприятий.

Однако несомненные экономические преимущества централизованного производства электрической энергии и простота ее распределения повели к тому, что вскоре после появления электродвигателей большинство новых предприятий стали оборудоваться не с общим трансмиссионным приводом от одного механического двигателя, а с крупногрупповым приводом, когда одним электродвигателем приводилось через трансмиссию и контрприводы сравнительно большее число рабочих машин. Тогда же появился и мелкогрупповой привод, при котором один двигатель приводил в движение небольшое число (группу) исполнительных механизмов. Далее постепенно последовал переход на одиночный привод, т. е. на привод каждой рабочей машины от отдельного двигателя. Такой переход был естественным, так как им проводилась до конца замена механических передач более выгодным электрическим распределением энергии, в особенности при централизованном ее производстве. Однако развитие одиночного привода

шло чрезвычайно медленно. Так, например, в то время как первый одиночный привод ткацкого станка был выполнен Siemens'ом для Берлинской выставки в 1879 г., впервые он нашел применение на ткацком станке в промышленности лишь в 1900-х годах.

При частичном переходе новых предприятий на одиночный привод чрезвычайно долго не оценивались все преимущества этого типа привода. В старых предприятиях одиночный привод, казалось, требовал лишь дополнительных расходов на новые двигатели и электрическую канализацию энергии. Во многих случаях в старых предприятиях разместить одиночные двигатели из-за отсутствия места не представлялось возможным. Электрификация старых предприятий в то время заключалась преимущественно лишь в переходе с общего трансмиссионного привода от паровой машины к трансмиссионному же приводу от электрического двигателя, реже—к крупногрупповому и еще реже к мелкогрупповому приводу. Новые предприятия, за теми исключениями, где разбросанность механизмов по условиям производства цеха требовала одиночных двигателей, оборудовались преимущественно групповыми двигателями, реже одиночными. Многим производственникам было не так легко понять целесообразность применения нового вида энергии. Что же касается использования одиночных двигателей, то оно сначала вызывало у многих неэлектриков недоумение, так как большое количество мелких двигателей, аппаратура и провода для них стоили дороже, чем установка одного двигателя с мощностью значительно меньшей суммы мощностей всех одиночных двигателей (за счет одновременности работы).

По данным крупных американских специалистов, относящимся к 1924 г., стоимость одного установленного киловатта двигателя, включая стоимость аппаратуры и проводов, при групповом приводе оказывалась в то время равной 29 долларам, при одиночном—150 долларам. Так как при одиночном приводе установленная мощность двигателя оказывалась часто в три—пять раз больше установленной мощности при групповом приводе, то стоимость 1 kW в 29 долларов приходилось сопоставлять со стоимостью 1 kW при одиночном приводе в $150 \cdot (3 \div 5) = 450 \div 750$ долларов. Это обстоятельство и отпугивало в свое время производителей и техников от применения одиночного привода. У некоторых лиц существовал такой взгляд, что электромашиностроительные фирмы предлагают одиночные двигатели исключительно с целью увеличить обороты своего капитала, хотя в первый период развития электропривода и этот фактор, несомненно, имел место.

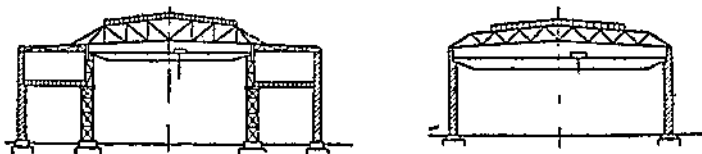
Однако отмеченный выше взгляд был близоруким. Сравнивая одиночный и трансмиссионный приводы, нужно естественно учитывать стоимость всего оборудования в целом, а не отдельные его части и сравнивать стоимость мелких двигателей с суммарной стоимостью крупного двигателя с трансмиссиями и передачами.

Для примера возьмем результаты подсчетов, производившихся

сравнительно не так давно для одного американского автомобильного завода с 500 станками и механизмами.

	Одиночный привод	Групповой привод
Первоначальная стоимость электрооборудования в долларах	90 220	53 570
Трансмиссии и передачи в долларах	16 800	57 300
Суммарная стоимость механического и электрического оборудования	107 020	110 870

Из приведенных цифр видно, что суммарная стоимость оборудования завода в данном случае оказывается практически одинаковой как при одиночном, так и при групповом приводе, так как более высокая стоимость электрической части при одиночном приводе компенсируется более высокой стоимостью механической части при групповом приводе. Эксплуатационная стоимость электропривода для того же завода за 5 лет по подсчетам оказалась равной 389 000 долларов при одиночном приводе и 477 000 долларов при групповом. При этом не учтено еще влияние повышения производительности рабочих машин, достигаемого при одиночном приводе, и меньшая стоимость здания в этом случае. При трансмиссиях неизбежно утяжеление конструкции зданий (левая часть фиг. 2), что не имеет места при одиночном приводе (правая часть фиг. 2). При одиночном приводе нет тех постоянных потерь,



Фиг. 2. Конструкция заводского здания при трансмиссионном и одиночном приводе.

которые имеют место в непрерывно вращающейся трансмиссии. Разница в к. п. д. одиночных и групповых электродвигателей не так уже велика, чтобы ей можно было противопоставлять потери в трансмиссиях.

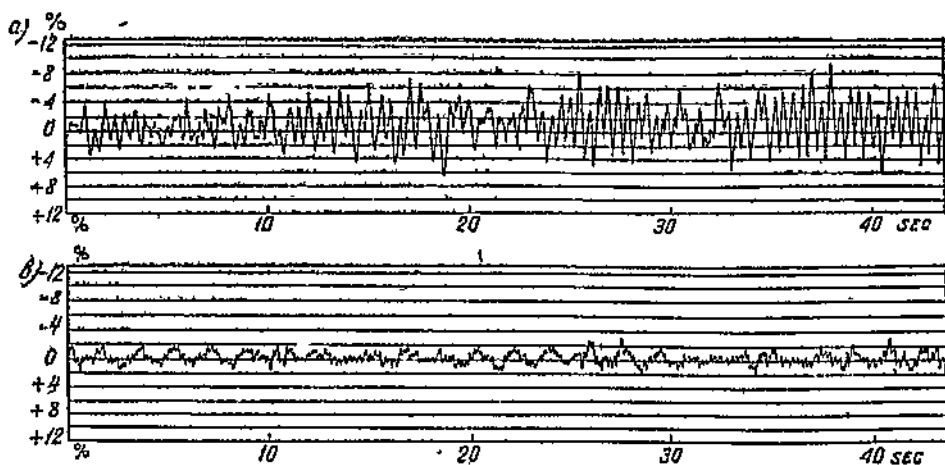
При этом приходится отметить ряд других преимуществ одиночного привода: 1) возможность расположения рабочих машин не в зависимости от трансмиссии, а в соответствии с ходом производственного процесса; 2) легкость переноса рабочей машины с места на место в связи с появлением новых методов производства, что во многих случаях имеет очень большое значение, например, при непрерывном развитии конструкций автомобильной промышленности; 3) возможность легкого оборудования производственных помещений подъемно-транспортными механизмами при легком подводе к ним электрической энергии; 4) лучшее освещение рабочих помещений, отсутствие теней от трансмиссий; 5) отсутствие лишней пыли, грязи и капающего из трансмиссий масла, т. е. боль-

шая чистота помещений; 6) более спокойное состояние рабочих вследствие отсутствия над головой вращающихся шумящих трансмиссий, естественно сказывающееся на повышении производительности; 7) лучшие условия безопасности; 8) возможность простой защиты рабочих машин от перегрузки путем установки на одиночных двигателях предохранителей и автоматов; 9) возможность применения при одиночном приводе двигателей с подходящими механическими характеристиками; 10) возможность точного учета работы отдельных механизмов и возможность исследования производственных процессов путем применения быстрописущих регистрирующих приборов и осциллографов.

Всех этих преимуществ уже вполне достаточно, чтобы в современной практике безоговорочно (за ничтожными исключениями) высказаться за применение одиночного привода. Это положение становится неопровержимым, если мы учтем еще один важнейший фактор—повышение производительности предприятий, которое дает одиночный привод по сравнению с групповым и трансмиссионным по всем вышеуказанным причинам.

Это положение выявилось вообще уже давно, причем в первую очередь на текстильных фабриках, и сыграло существенную роль в дальнейшем распространении и развитии одиночного привода. Опыт эксплуатации первых электрифицированных текстильных фабрик показал значительное повышение их производительности при переходе с группового привода на одиночный. Производительность банкаброшей в результате такого перехода повысилась на 10—15%, шерстяных селфакторов на 15%, кольцевых ватеров на 25%, ткацких станков на 20%. Причины этого заключались в следующем. Неравномерная нагрузка трансмиссий и большая длина трансмиссионного вала вызывают эластичное скручивание вала и колебание его скорости. В текстильных машинах всякое повышение скорости выше допустимой может вызывать обрыв пряжи, понижение же скорости по сравнению с целесообразной ведет к уменьшению производительности. На фиг. 3а представлено колебание скорости трансмиссии суконной фабрики с 20 ткацкими станками. Колебания скорости при этом достигают $\pm 9\%$. Очевидно, что передачи к отдельным станкам должны быть подобраны таким образом, чтобы при отклонении скорости какого-либо участка трансмиссии на $\pm 9\%$ скорость станка не превышала нормальной. При этом остальное время станки должны работать при уменьшенной скорости, т. е. с пониженной производительностью. На фиг. 3б показаны колебания скорости ткацкого станка вследствие переменных усилий его одного при одиночном приводе. Очевидно, что при переходе с группового привода на одиночный механизм работает с лучшим использованием.

Все указанные обстоятельства повели к тому, что в современной практике одиночный привод получил повсеместное распростра-



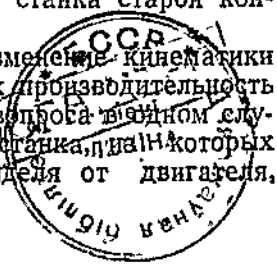
Фиг. 3. Колебания скорости ткацкого станка:
 а—при групповом; б—при одиночном приводе.

нение, трансмиссионный и групповой приводы отошли уже в область предания.

Это обстоятельство не могло не оказать революционизирующего влияния на производственные цехи и сами исполнительные механизмы. Все старые рабочие машины стремились для трансмиссионного привода. Если по условиям работы (например, в металлорежущих станках) требовалась регулировка скорости, то эта регулировка достигалась исключительно устройством ступенчатых шкивов, зубчатых передач и т. д. Желание упростить рабочую машину заставляло иногда даже отказываться от регулировки скорости, хотя с точки зрения производственного процесса она была целесообразной.

При применении регулируемых электродвигателей регулировка скорости может быть перенесена непосредственно на них. Конструкция самой рабочей машины при этом упрощается. Таким образом возникает встроенный одиночный привод, при котором двигатель пристраивается к рабочей машине путем каких-либо специальных креплений, например фланцев. Будучи снят с данной рабочей машины, встроенный двигатель не может быть установлен на другой (не аналогичной) рабочей машине. Так, фланцевый двигатель для современного металлообрабатывающего станка не может служить для привода станка старой конструкции со ступенчатыми шкивами.

Важно отметить, что рациональное видоизменение кинематики металлорежущих станков сильно влияет на их производительность и расход энергии в них. Для изучения этого вопроса в одном случае были взяты три аналогичных токарных станка, два из которых первый имел непосредственный привод шпинделя от двигателя,

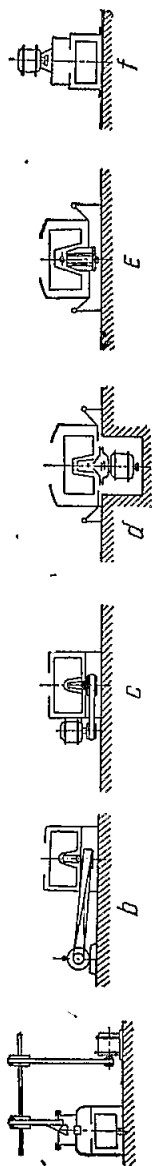


второй—через зубчатые колеса, третий—через ступенчатые шкивы. Удельная производительность в килограммах на киловатт-час возросла для первого типа в 13,4 кг, для второго—в 8,3 кг, для третьего—в 7,2 кг. Значение этого вопроса станет более ясным, если мы учтем совершенную необходимость экономного расходования электроэнергии в целях наилучшего использования топливных и водяных ресурсов нашей страны.

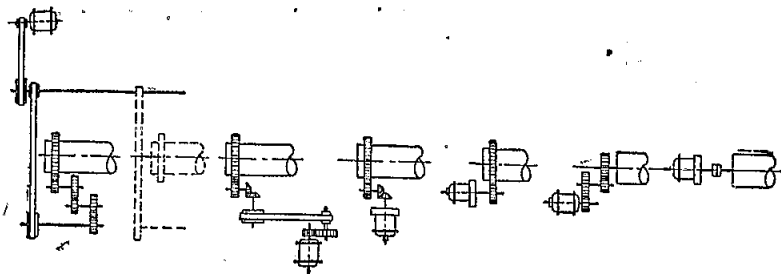
Вызванное влиянием одиночного электропривода видоизменение конструкции рабочих машин и двигателей для них имело место в большом числе отраслей промышленности.

Фиг. 4 иллюстрирует постепенное видоизменение одиночного привода текстильной центрифуги. Первоначальный тип одиночного привода показан на фиг. 4а и б. Он требует много места. Гораздо целесообразнее было применить привод по типу 4с с коротким расстоянием между центрами шкивов. Однако еще более совершенный тип привода получается с подстроенным (фиг. 4d), встроенным (фиг. 4е) и надстроенным двигателями (фиг. 4f), которые и применяются в настоящее время. На фиг. 5 представлен один из простейших (по форме) случаев изменения кинематики привода печей в цементной промышленности. Постепенное вытеснение промежуточных передач понятно без особых объяснений.

Такое же самое место, как и встроенный электропривод, среди современных совершенных форм электропривода занимает многодвигательный привод, в котором отдельные механические звенья одной и той же рабочей машины приводятся отдельными двигателями. Иногда число этих двигателей в многодвигательном приводе одной рабочей машины (например, металлорежущего станка) доходит до нескольких десятков. В зависимости от рода рабочей машины отдельные двигатели могут выполнять одни и те же или различные операции. Так в сверлильном станке несколько двигателей могут приводить в движение несколько сверл. В типичном мостовом кране, где многодвигательный привод совершенно неизбежен, один двигатель служит для подъема груза, второй—для перемещения тележки, третий—для перемещения моста. Многодвигательный привод часто упрощает кинематику рабочих машин, уменьшает



Фиг. 4. Видоизменение одиночного привода текстильной центрифуги.



Фиг. 5. Видоизменение передач между двигателем и цементной печью.

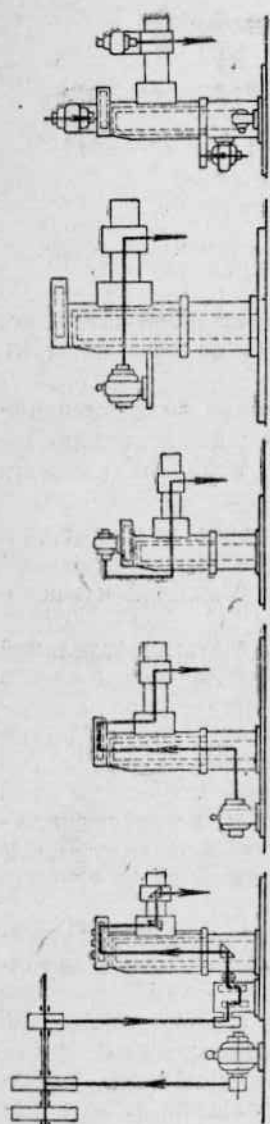
потери в промежуточных передачах, улучшает обслуживание, повышает производительность, а в ряде случаев дает продукт лучшего качества.

Фиг. 6 показывает имевшее место постепенное видоизменение привода радиально-сверлильного станка. Из него видно, как постепенно, укорачивая путь для передачи энергии, подошли, наконец, к многодвигательному приводу.

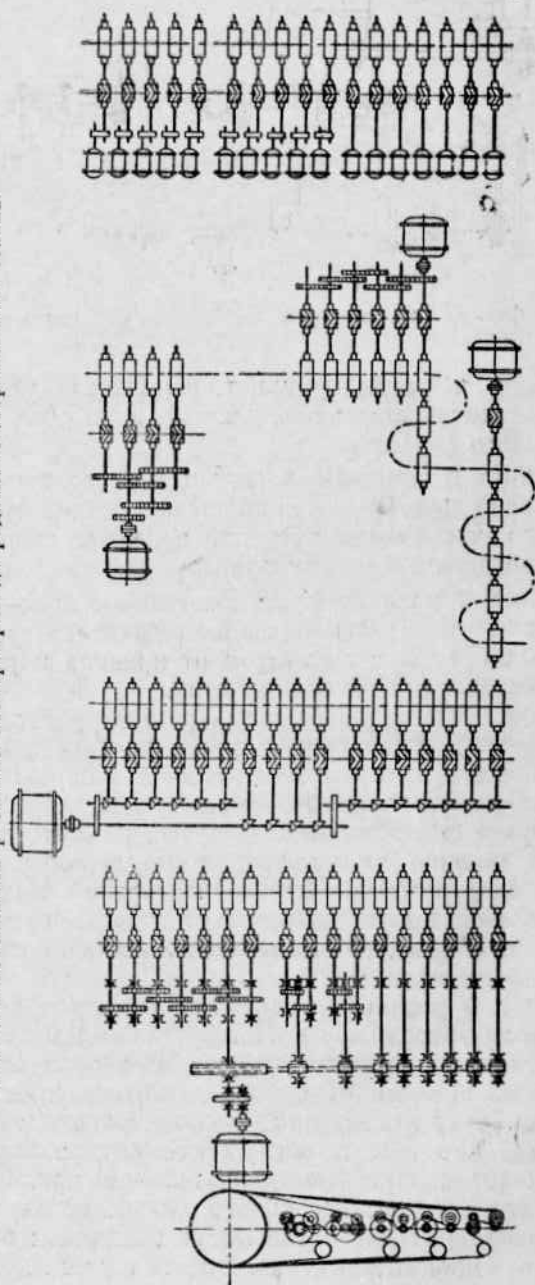
Фиг. 7 иллюстрирует постепенное видоизменение под влиянием электрического привода кинематики нереверсивных прокатных сортовых станов с переходом от привода паровой машиной к многодвигательному электрическому.

Фиг. 8 показывает развитие электропривода бумагоделательной машины. Регулируемый привод постоянного тока дал возможность выбросить из бумагоделательной машины регулирующую коническую передачу, необходимую при паровой машине для регулировки скорости. Многодвигательный привод позволил отказаться в этой машине от многочисленных передач. Самый последний тип многодвигательной бумагоделательной машины с приводом каждого сушильного цилиндра от отдельного электродвигателя (средняя часть фиг. 8d) дает возможность дальнейшего отказа от ряда зубчатых передач.

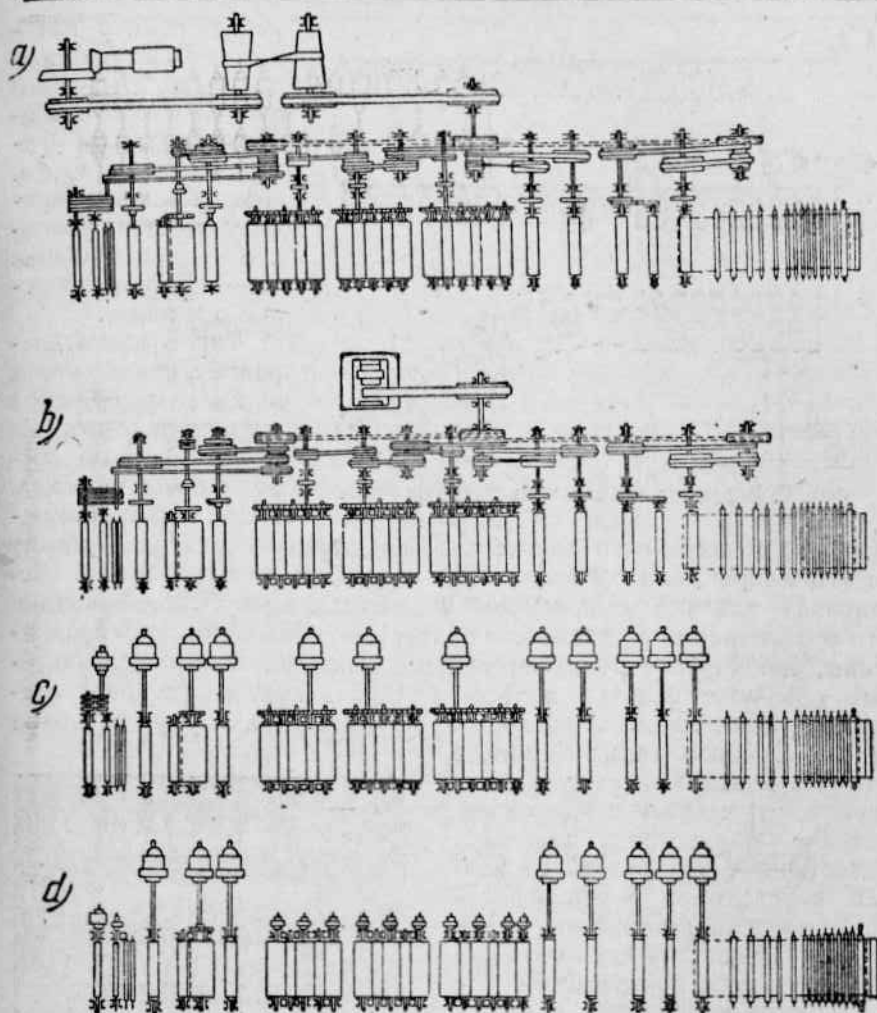
Фиг. 9 показывает эволюцию электропривода рольгангов, служащих для передачи металла к прокатным станам и от них, в металлургической промышленности. В первоначальной схеме привода группы роликов от одного двигателя поломка одной конической передачи к какому-либо ролику вызывала остановку всего рольганга, а с ним и обслуживаемого рольгангом мощного прокатного стана. При многодвигательном приводе рольганг может работать и при выходе одного или нескольких двигателей из строя. Неисправные двигатели могут вращаться без тока, не задерживая работу прокатного стана. Вместе с тем многодвигательный привод рольгангов дает возможность располагать ролики по кривой, что иногда весьма существенно для рационального проектирования структуры цеха.



Фиг. 6. Постепенное развитие электропривода радиально-сверлильного станка.



Фиг. 7. Видоизмененные приводы сортовых станов.

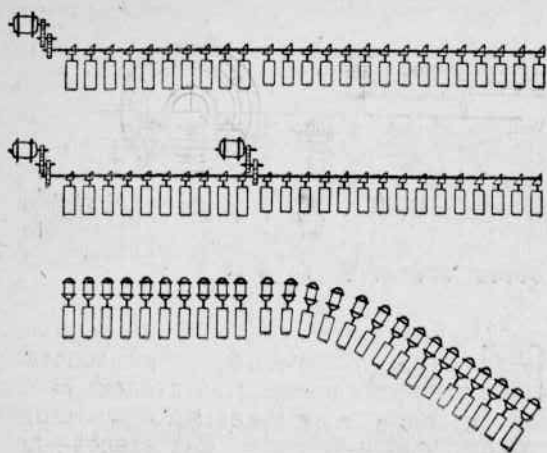


Фиг. 8. Развитие электропривода бумагоделательной машины.

a — привод от паровой машины; *b* — привод от регулируемого двигателя; *c* — многодвигательный привод; *d* — дальнейшее развитие многодвигательного привода.

На фиг. 10 показан многодвигательный привод рогулечного ватера (пряделной машины) текстильной промышленности. Здесь каждая рогулька приводится отдельным двигателем мощностью 0,05—0,1 кВт. В одном ватере несколько десятков таких двигателей. По сравнению с одиночным приводом ватера многодвигательный привод дает уменьшение потребления энергии на 20—40% при повышении производительности рогульки на 40—100%.

К числу таких же, а может быть и несколько более совершенных типов привода следует отнести привод таких исполнительных



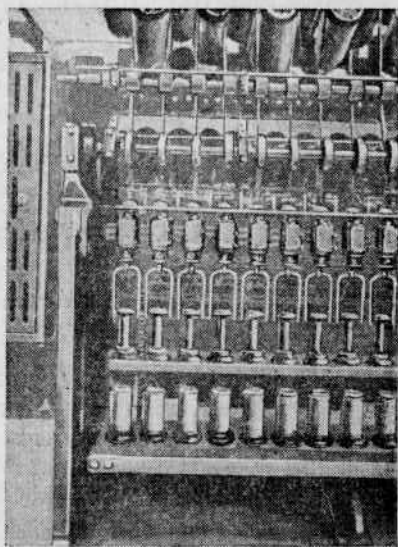
Фиг. 9. Эволюция электропривода рольгангов.

ружным) асинхронного двигателя. Неподвижная статорная обмотка этого двигателя располагается внутри. В электрокардной (чесальной) машине с приводом по системе инж. П. А. Фридкина ротор асинхронного двигателя является барабаном кардной машины, снабженным дополнительными медными стержнями, которые образуют беличье колесо. Обмотка статора (дуговой статор) занимает лишь часть дуги и располагается внутри барабана (фиг. 12). Число таких машин, в которых двигатель слился с механической частью в единое неделимое целое, пока невелико. Естественно, что далеко не всякая конструкция «электрифицированной машины» окажется технически и экономически приемлемой по своим показателям. Все зависит от кинематики машины. Нельзя думать, что все производственные машины смогут в дальнейшей стадии стать так называемыми «электрифицированными машинами». Многие механические автоматы, хотя бы, например, папиросонабивные машины, конфектные, коженные машины, не могут быть заменены автоматами, построенными целиком на электрической основе.

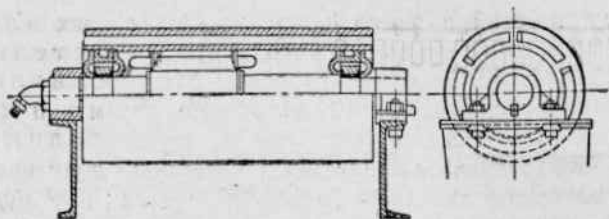
Все изложенное показывает, что электрификация рабочих ма-

механизмов, у которых электродвигатель тесно сливается с ними в единое неделимое целое. Иногда такому приводу придают условное наименование «электрифицированной машины».

Так в двигателе-роликке, применяемом в металлургической промышленности (фиг. 11), ролик, перемещающий металл, является ротором (на-



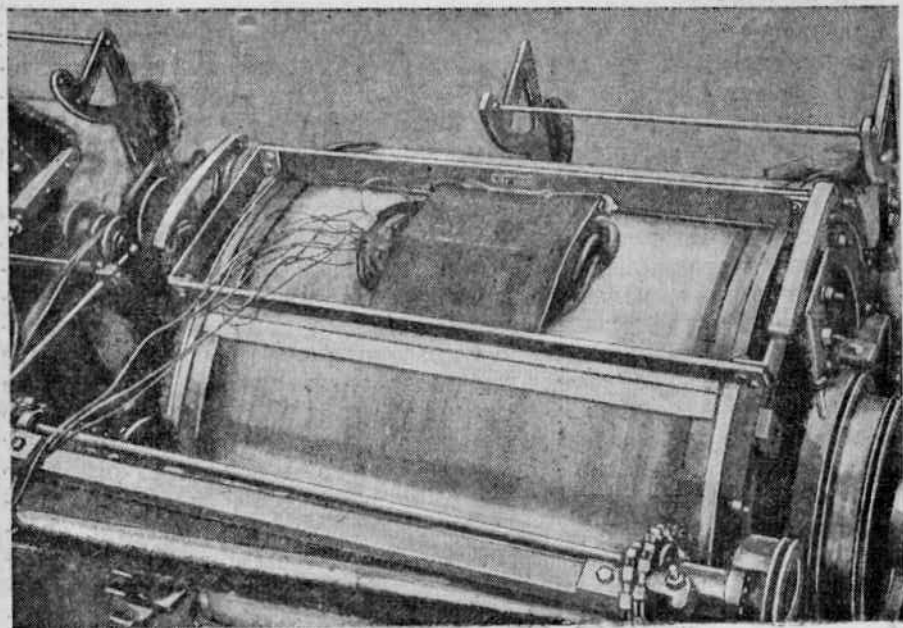
Фиг. 10. Многодвигательный привод рогулечного ватера.



Фиг. 11. Разрез по двигателю-ролику.

шино-орудий оказала революционизирующее влияние не только на кинематику самих рабочих машин, структуру производственных цехов, но также и на конструкцию электродвигателей. Наряду с применением двигателей так называемого «общего пользования» пришлось создать серии специальных типов двигателей—прокатных, металлургических, крановых, фланцевых и шпиндельных для металлорежущих станков, текстильных, двигателей для врубовых машин и т. д. Стандартизация электродвигателей, понятно, остается, но в современной практике она частично должна вестись по соответствующим отраслям промышленности.

При этом исключительно широком применении электропривода промышленность идет, с одной стороны, по пути дальнейшего по-



Фиг. 12. Электрокардная машина с приводом по системе инж. П. А. Фридкина.

вышения мощностей в таких исполнительных механизмах, как, например, прокатные станы, бумагоделательные машины, шахтные подъемники и т. д. С другой стороны, для целей современного электропривода используются карликовые двигатели (мощностью от 100W до 1W) и микродвигатели (с мощностью меньше 1W). Наряду с двигателями мощностью в несколько десятков тысяч киловатт встречаются двигатели мощностью до $3 \cdot 10^{-8}$ kW (для привода механизма электрических часов).

Весьма широкое применение за годы войны электропривод нашел в авиации. Современные мощные американские самолеты имеют до 150—200 электроприводов.

Еще не так давно (у нас практически до тридцатых годов данного столетия) к проектировке электрического привода относились весьма легко и просто. Проектировалась рабочая машина, а затем к ней подбирали подходящий двигатель. Точно так же при проектировке того или другого промышленного предприятия часть механического оборудования проектировалась почти независимо от электрического, которое затем просто добавлялось к механическому. Теперь постановка этого вопроса в корне должна была измениться. Электропривод уже настолько глубоко вошел в жизнь промышленных предприятий, что он сильно изменяет ход производственных процессов, конструкции цехов и рабочих механизмов. Стоимость цехового электрооборудования часто составляет большой процент от стоимости цехов. Проектирование электрического привода теперь начинается с самой стадии производства рабочих машин, и только при таких условиях возможно получить наилучший эффект в отношении производительности предприятий, качества и себестоимости продукции. Проектирование зданий промпредприятий, проектирование механической и электрической части промпредприятий теперь ведется совместно и параллельно.

Проектирование современного электропривода усложнилось еще потому, что за последнее время в силу стремления достигнуть от рабочих машин наибольшей производительности, лучшего качества продукта, меньшего расхода энергии и более простого обслуживания—стали исключительно широко применять автоматическое и полуавтоматическое управление электроприводом. Хотя полуавтоматическое управление было использовано впервые в США на металлургических заводах еще в 90-х годах прошлого столетия, широкое применение автоматизация стала находить у нас лишь за последние 15 лет. За эти годы появилось огромное количество различных видов полуавтоматической и автоматической аппаратуры (контакты, реле, путевые выключатели, различные типы командных аппаратов, регуляторы и т. д.). От полуавтоматического управления отдельными механизмами теперь переходят уже к комплексному управлению огромными производственными агрегатами, которые включают большое число исполнительных механизмов, увязанных в единую комплекс-

ную автоматическую систему. Большую роль в достижениях комплексной автоматизации и автоматизации вообще играют развившиеся за последнее время различные типы пассивных электронных аппаратов (фотоэлементы, усилительные лампы, тириатроны, игнитроны, ртутные выпрямители, неоновые лампы и т. д.). Безинерционность указанных аппаратов в ряде случаев дает возможность лучшего решения задач автоматизации, чем контакторно-релейная автоматика. Выбор схемы управления электроприводом во многих случаях оказывается более сложным, чем выбор типа и мощности электродвигателя.

Совместное комбинирование свойств двигателей и свойств различной аппаратуры дает возможность удовлетворить почти всем требованиям, которые ставятся производством. При этом автоматизированный электропривод становится основным механизующим и автоматизирующим звеном большинства промышленных предприятий.

У нас в СССР современный электропривод получил исключительно широкое развитие преимущественно в годы сталинских пятилеток. Ко времени Великой Октябрьской социалистической революции электропривод заводов старой России находился на уровне 1910—1912 гг. Как раз с этих годов началось исключительно интенсивное развитие электропривода за границей. Так, первые электроприводы прокатных неререверсивных и реверсивных станов были осуществлены в 1905—1907 гг. Первые патенты на многодвигательный привод бумагоделательной машины появились в 1905—1910 гг. Ко времени окончания гражданской войны и интервенции мы весьма отставали в области электропривода. Этому способствовало то обстоятельство, что старая Россия по существу не имела собственных электротехнических заводов. Почти все имевшиеся электротехнические заводы принадлежали иностранным фирмам. Вопросы электропривода на них совершенно не разрабатывались, заводы жили целиком по указке их зарубежных хозяев и занимались не разработкой новых конструкций, а в основном сборкой машин и аппаратов по чертежам, полученным из-за границы от владельцев заводов.

В. И. Лениным в 1920 г. было дано указание о разработке плана электрификации СССР (плана ГОЭЛРО) и был выдвинут лозунг: «Коммунизм—это есть Советская власть плюс электрификация всей страны» (Ленин, т. XXVI, стр. 45). Тем самым было подчеркнуто исключительно важное значение электрификации, достигаемой в промышленных предприятиях, прежде всего посредством применения электропривода.

С этого периода началось тщательное изучение опыта использования современного электропривода за границей и перенос этого опыта на советскую почву. Целый ряд новых предприятий, а частично и старых получил еще в 20-х годах современные системы

электропривода. Наиболее интенсивное развитие электропривода в СССР началось с периода проведения индустриализации страны, т. е. с начала первой сталинской пятилетки, когда началось строительство многочисленных промышленных гигантов в разных отраслях промышленности. Все новые предприятия строились уже на базе самой широкой механизации производственных процессов.

Механизация и тесно связанная с ней автоматизация потребовала широкого развития отечественного электропривода. Восприняв заграничный опыт, мы быстро довели производство советского электропривода до заграничного уровня. В этом отношении наибольшие достижения имеет Харьковский электромеханический завод им. Сталина (ХЭМЗ—в области комплексного автоматизированного электропривода); орденосный завод «Электросила» им. Кирова (в области электрических машин и ртутных выпрямителей); завод Динамо (в области электрооборудования подъемно-транспортных сооружений и в области автоматической аппаратуры).

Перед самым началом Великой Отечественной войны наша страна намечала полную ликвидацию нашего отставания по линии изготовления большего числа типов разнообразных, специализированных для разных отраслей промышленности электрических машин, в частности редукторных двигателей (т. е. с встроенным редуктором), по линии создания большего разнообразия неавтоматической и автоматической аппаратуры для управления электроприводом и по линии более широкого внедрения в управление электроприводом конно-электронной автоматики.

Подлое нападение озверелого фашизма на народы Советского Союза вызвало широкое развертывание нашей промышленности в восточных районах страны как за счет расширения старых предприятий, постройки новых, так и за счет перебазирувания заводов из временно оккупированных фашистами районов. При этом в связи с обязательными требованиями интенсификации военного производства приходилось решать целый ряд сложных задач электропривода и автоматики. В наших дальнейших задачах нового промышленного строительства, а также при восстановлении разрушенных фашистскими извергами предприятий мы должны широко использовать весь имеющийся к настоящему времени опыт в области электропривода.

2. Определение понятия „электропривод“

Задача электропривода заключается в том, чтобы приводить в движение те или иные исполнительные механизмы (рабочие машины). Всякая машина, как известно, представляет собой некоторую кинематическую систему тел, из которых часть находится в движении, чем и совершается та или другая работа, необходимая для выполнения производственного процесса. Электродвигатель, будучи сам-машиной, использующей электромагнитную энергию, служит

в преобладающем большинстве случаев не для непосредственного участия в процессе, а лишь для приведения в движение производственных машин, выполняющих тот или иной вид работы.

Под электроприводом следует понимать машинное устройство, состоящее из трех главнейших звеньев: 1) электродвигателя; 2) передач от двигателя к исполнительному механизму; 3) аппаратуры для управления двигателем.

Вместе с исполнительным механизмом электропривод образует более сложное машинное устройство, которое может быть названо электрифицированным производственным агрегатом. За ничтожнейшими исключениями электропривод всегда содержит три указанных выше звена, хотя последние два из перечисленных и могут быть в отдельных частных случаях очень простыми. Так, передача от двигателя к исполнительному механизму может быть просто сцепной муфтой, а аппаратура для управления двигателем — простым рубильником. Однако все три перечисленных звена входят в понятие электропривод. Лишь в некоторых частных случаях второе звено (передача) может выпадать.

При конструировании всякой производственной машины любой кинематический процесс, необходимый для решения той или иной технологической задачи, приходится делить на ряд более простых элементарных кинематических процессов, осуществляемых простейшими механизмами. Когда мы начинаем производить сочленение двигателя с рабочей машиной при проектировании электрифицированного производственного агрегата и делаем дробление подобного сложного машинного устройства на простейшие кинематические связи, мы иногда приходим к заключению о целесообразности выбрасывания промежуточных звеньев. Так получился двигатель-ролик, в котором рабочий транспортирующий орган служит ротором электродвигателя, так получилась кардная машина инж. Фридкина и т. д. Очевидно, что подобное видоизменение кинематики является результатом соединения структуры отдельных механизмов в общую машину.

Из предыдущего параграфа видно, что одна из главнейших тенденций современного привода заключается в рациональном видоизменении структуры исполнительных механизмов при сочленении их с электроприводом в сложное машинное устройство.

В зависимости от условий работы электрифицированного производственного агрегата управление им может быть или автоматическим или неавтоматическим. В современной практике неавтоматическое управление по указанным ранее причинам применяется весьма редко. Электропривод с неавтоматическим управлением назовем неавтоматизированный электропривод; электропривод с автоматическим управлением — автоматизированный электропривод.

При пресекировании элементарных кинематических процессов рабочих машин, необходимых для того или другого технологиче-

ского процесса, часть их неизбежно приходится переносить на рабочего. Поэтому и при управлении электроприводом часть операций приходится выделять на машиниста. Отсюда в ряде случаев возникает практически необходимость в полуавтоматическом управлении. В силу сложности технологических процессов этот тип управления электроприводом является исключительно распространенным. Электропривод с подобным видом управления назовем полуавтоматизированный электропривод. В качестве примеров могут служить хотя бы многочисленные системы управления различными подъемно-транспортными приспособлениями. Управление подобным электроприводом чаще всего производится машинистом посредством некоторого переключателя, или, как мы его называем, коммандо-контроллера, соединение или размыкание контактов которого обуславливает замыкание и размыкание цепей и катушек контакторов и реле схемы управления.

Поведение электропривода зависит от свойств двигателей и характера и комбинации примененной аппаратуры. Используя различную аппаратуру, можно менять механические свойства двигателей. Ряд технологических процессов может быть выполнен электродвигателями лишь при непрерывном воздействии на них той или другой аппаратуры. Поэтому аппаратура составляет неотъемлемую часть современного «комплексного» электропривода.

3. Основные задачи проектирования и эксплуатации электропривода

Специализирующиеся в области электрооборудования промышленных предприятий должны знать электропривод с трех сторон: 1) проектирования; 2) монтажа; 3) эксплуатации. Наибольшую сложность представляет проектирование привода, так как для проектирующего обязательно знание условий работы электропривода в соответствующей отрасли промышленности, т. е. условий монтажа и эксплуатации и специфики работы машин этой отрасли производства. Навыки по обслуживанию, монтажу, капитальному и планово-предупредительному ремонту приобретаются лишь во время практической работы на заводах.

Рациональное проектирование электропривода может быть выполнено лишь в том случае, если известна кинематика исполнительного механизма и его условия работы. Как уже отмечалось выше, в современной практике проектирование электропривода должно вестись совместно с проектированием рабочей машины, т. е. с самой начальной стадии ее конструирования. Лишь в этом случае может быть достигнуто наилучшее сочетание электропривода с исполнительным механизмом и получена наибольшая производительность последнего. Все особенности производственного процесса рабочих машин должны быть учтены в первую очередь и на базе этих особенностей и должен проектироваться электропривод.

Задачи проектирования электропривода довольно разнообразны. Прежде всего возникает вопрос о выборе между регулируемым и нерегулируемым двигателем. Эта задача тесно связана с конструкцией рабочей машины и ее свойствами. Различная кинематика рабочих машин и различные производственные процессы могут требовать двигателей как с нерегулируемой скоростью, так и с регулируемой с разными пределами регулировки. В последнем случае при анализе кинематической схемы агрегата должны быть предусмотрены требования рабочей машины в отношении регулировки скорости. Последние должны выполняться, исходя из: 1) необходимых пределов регулирования; 2) нужной плавности регулирования; 3) сочетания регулировочных свойств электропривода с требующимися рабочими машинами-орудиями механическими характеристиками с определенной степенью жесткости или мягкости; 4) требующихся минимальных перемещений звеньев механизма.

Выбор комплекса необходимых механических характеристик двигателя тесно связан с требованиями производственной машины. От одного и того же типа двигателя можно получать разные механические характеристики. Например, асинхронный короткозамкнутый двигатель может быть взят с большим или меньшим сопротивлением в обмотке ротора в зависимости от требований рабочей машины к пусковому и перегрузочному моменту и скольжению при номинальной нагрузке. Компаундный двигатель постоянного тока может быть выбран с разной степенью компаундирования. Серийному двигателю постоянного тока в специальных схемах включения можно придавать весьма разнообразные механические характеристики. Сюда же относится вопрос о выборе различных сложных схем для регулировки скорости и реверсирования на постоянном и переменном токе, вопрос о выборе целесообразной схемы для лучшего использования маховых масс.

Одновременно должен быть решен вопрос о способе связи двигателя с органами рабочей машины, т. е. произведен выбор типа механической передачи. Непосредственные соединения двигателей с рабочими орудиями вообще очень редки. Вопрос о передаточном числе для механизмов длительного режима работы решается величиной капитальных затрат и расходом энергии (величина $k \cdot n \cdot d \cdot \cos \varphi$), для механизмов же повторно-кратковременного режима в первую очередь длительностью переходных режимов, т. е. влиянием на производительность механизма. Иногда приходится проделывать расчеты для нескольких передаточных чисел. Установление наиболее выгодного передаточного числа дает возможность предварительно выбрать по заводским каталогам подходящие типы двигателей с учетом необходимой для них конструктивной и атмосферной защиты.

Непосредственно к вопросу о регулировке скорости примыкает задача о роде тока для питания установленного электродви-

гателя. Выбор рода тока решается часто не для одной рабочей машины, а для группы машин или целого цеха совместно. При этом необходимо бывает учитывать как влияние выбора рода тока на производительность рабочих машин, так и стоимость электрооборудования при постоянном и переменном токе.

Далее следует детальное рассмотрение переходных режимов электропривода с точки зрения: 1) времени переходного режима, как основного фактора, определяющего производительность рабочих машин; 2) плавности протекания переходных процессов; 3) осуществления в случае необходимости точных остановок; 4) надежности; 5) перегрузочной способности; 6) потерь электропривода в переходных режимах. Некоторые из перечисленных вопросов, например 1 и 6, для механизмов длительного режима работы имеют малое значение.

Анализ работы агрегата в переходных и статических режимах дает возможность построить нагрузочные диаграммы электропривода и по ним определить потребную мощность двигателя. В случае ее несовпадения с предварительно выбранной, все динамические расчеты должны быть проделаны вновь. Сложность анализа зависит от типа привода и требований механизма. В основном мощность двигателя агрегата выбирается по нагреву, а потому она нуждается в последующей проверке статической и динамической перегрузочной способности, иногда контроле за устойчивостью и в проверке достаточности пускового момента. Случаи выбора только по перегрузке относительно редки.

Вопрос определения мощности выбираемого типа двигателя является исключительно важным. В условиях стандартизации изготовления двигателей эта задача часто сводится к проверке пригодности предварительно выбранного по тем или другим данным габарита двигателя. Неверный выбор мощности ведет к недопустимым или к нежелательным результатам как при преуменьшении, так и при преувеличении мощности. Выбор двигателя меньшей мощности по сравнению с потребной имеет следствием аварии, простои, необходимость замены установленного двигателя другим, более мощным, и вследствие указанных обстоятельств вызывает неизбежное снижение производительности. Большая мощность двигателя вызывает повышение стоимости электрооборудования, а также увеличение потерь вследствие работы двигателя при пониженном к. п. д. В асинхронных двигателях переменного тока преувеличение мощности ведет к понижению коэффициента мощности, также влияющего на стоимость энергии.

Одновременно с подсчетами по мощности двигателя приходится выяснять возможность для выбранного электропривода выполнения необходимых операций согласно заданному графику в нужный срок, диктуемый производительностью рассматриваемой рабочей машины. В ряде случаев возникает необходимость выяснения

допустимого числа включений двигателя за час.

В зависимости от условий работы двигателя в отношении окружающей среды и характера нагрузки приходится решать вопрос о конструктивном типе двигателя, о его защите и вентиляции.

Вопросы управления двигателем и расчета мощности тесно связаны с задачей выбора аппаратуры управления. Для одного и того же типа двигателя могут быть применены разные виды управления, не говоря уже о том, что аппаратура может быть открытой, закрытой, герметичной и т. д.

Можно взять двигатель с механическими характеристиками, вообще вполне подходящими для привода данной рабочей машины; однако применением неподходящей для данного случая аппаратуры управления можно прекрасные свойства двигателя в отношении достижения высокой производительности механизма частично свести на-нет.

При выборе аппаратуры приходится учитывать целый ряд условий работы электропривода. Укажем лишь некоторые. Так, для пуска важно знать: как часто происходит пуск, реверсирование, пускается ли машина всегда под нагрузкой или иногда при холостом ходе, насколько необходима плавность пуска, какова величина потребного от двигателя пускового момента, какой аппарат дает импульс для пуска электропривода.

Для остановки важно знать: необходимую автоматизацию остановки, потребность в быстрой остановке, потребность в точной остановке в фиксированном положении и чем она может быть достигнута; потребность в аварийном торможении, потребность в применении электромагнитных тормозов.

Точно так же имеет значение потребная защита электроприводов как с механической, так и с электрической стороны.

Подсчет мощности, выбор типа привода, выбор схемы главной цепи, схемы управления и аппаратуры для нее по существу охватывают все основные вопросы, подлежащие разрешению при проектировании электроприводов, и дают возможность оценить выбранный привод (или приводы) уже экономически.

Дальнейшие задачи должны заключаться в конструктивном и по возможности наиболее компактном размещении электрооборудования, оценке условий обслуживания и степени автоматизации, учете условий ремонта. Последняя составляющая оценивается отдельно лишь для мощных электроприводов. Обслуживание ремонтом и наблюдение за двигателями малой и средней мощности учитывается обычно сразу по цехам. При сравнении нескольких предварительно выбранных вариантов в результате проектирования должны быть сопоставлены их производительности, получаемое качество продукции, капитальные затраты, эксплуатационные расходы и удобства обслуживания.

При практическом проектировании электропривода все перечисленные выше вопросы переплетаются и в большинстве случаев их приходится рассматривать совместно. Так, лучшие свойства автоматической аппаратуры постоянного тока в ряде случаев дают перевес двигателям постоянного тока над двигателями переменного тока. Главнейшее значение в проектировании имеет стремление достигнуть высокой производительности рабочих машин при наилучшем качестве продукции, наименьшем расходе энергии и более удобном обслуживании. Не менее существенна и экономическая сторона вопроса. С этой точки зрения приходится учитывать капитальные расходы на оборудование, эксплуатационные расходы на энергию, обслуживание, ремонт, расходы на преобразование энергии, если таковое производится. В отдельных случаях вопрос сильно усложняется, так как определенные комбинации электропривода дают повышение производительности предприятия, величина которого до эксплуатации точно учтена быть не может.

Отмеченные обстоятельства затрудняют установление определенной для всех случаев последовательности выполнения всех намеченных проектировкой задач благодаря некоторой зависимости выбора одного фактора от другого. Выше намечена принципиальная последовательность решения задач по проектировке электропривода. По методическим соображениям, а также по соображениям наиболее экономной компоновки материала курса в число часов, заданных учебным планом, изложение всех перечисленных вопросов в учебном курсе приходится вести в ином порядке, начиная с выбора мощности двигателя, а лишь затем переходить к остальным.

Подобное изложение материала, принятое в данном курсе, автор считает наиболее логичным и удобным для усвоения при минимуме времени. Ввиду того что конструкция механических передач и основы их расчета детально изучаются студентами при прохождении курса деталей машин и прикладной механики, разбор свойств и параметров механических передач из данного курса выпущен. Эти вопросы упоминаются в случае нужды лишь попутно. Данный учебник не затрагивает подробно вопросов пускорегулирующей аппаратуры и автоматического управления электроприводами, так как они освещаются в отдельных курсах.

Направления, пути развития и ближайшие задачи советского электропривода рассмотрены автором в его работах, опубликованных в журнале «Электричество» и в «Известиях ОТН Ак. Наук» [Л. 31, 33].

ГЛАВА II

ВЫБОР МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ДОПУСТИМОГО НАГРЕВА И МГНОВЕННЫХ ПЕРЕГРУЗОК

4. Общий подход к выбору мощности двигателей

При проектировании электропривода в большинстве случаев выбирают двигатель подходящей мощности, или, как часто говорят, подходящего габарита, из той или иной выпускаемой заводами нормальной или специализированной серии. Так, для прокатных станков выбирают из серии прокатных двигателей, для кранов — из серии крановых двигателей, для текстильной промышленности — из серии текстильных двигателей. Там, где производство не предъявляет специфических требований, применяют двигатели единой серии, которые могут быть названы, по-американски, двигателями общего применения.

Специальные двигатели для той или другой рабочей машины проектируются относительно редко. Специфика большинства рабочих машин должна учитываться и учитывается при разработке машиностроительными заводами специализированных серий на базе единой серии.

Как видно будет из дальнейшего, выбор мощности двигателя требует предварительного знания некоторых параметров самого двигателя, без которых вопрос о выборе мощности решен быть не может. Так, необходимо знание величины, характеризующей маховые массы двигателя, его механической характеристики, т. е. зависимости вращающего момента двигателя от скорости вращения $M = f(n)$ и др. Поэтому практически при выборе мощности двигателя для рабочей машины по существу приходится предварительно ориентировочно наметить тот или иной тип (мощность, габарит) двигателя на основании некоторых данных, характеризующих его работу на производственном механизме, и затем проверять его пригодность для рассматриваемой рабочей машины. Таким образом выбор мощности практически сводится к проверке пригодности предварительно намеченного габарита двигателя. Однако методика проверки по существу остается такой же, как если бы приходилось просто определять мощность двигателя в случае необходимости его конструировать вновь. По этим сообра-

жениям мы именуем данную главу—главой выбора (а не проверки) мощности двигателя.

В том случае, когда выбираемый двигатель питается от специального преобразовательного или регулирующего машинного агрегата, общая методика выбора мощности этого агрегата остается той же самой, что и для двигателя. Поэтому все рассматриваемое ниже относится в полной мере как к двигателям, так и к специальным питающим их агрегатам.

5. Факторы, определяющие номинальную и перегрузочную мощность электрической машины

Характеризуя мощность электродвигателя и электрической машины вообще, необходимо различать три характерных категории мощности: 1) номинальную длительную мощность, которую электрическая машина может развивать в течение произвольно долгого времени. Эта мощность, указываемая на щитке двигателя, ограничена его нагревом, который является результатом выделения в машине потерь при превращении одного вида энергии в другой. Практически допустимый предел нагреву машины ставит применяемый в машине род изоляции. При данной температуре окружающей среды номинальная мощность есть величина вполне определенная; 2) мгновенную перегрузочную мощность машины, которую последняя может дать, исходя из нагретого состояния, в течение весьма малого промежутка времени, без последующего нарушения нормальных условий ее работы. Эта мощность определяется электрическими свойствами электродвигателя и его механической конструкцией; 3) кратковременную перегрузочную мощность машины, которую машина может дать в течение вполне определенного промежутка времени (5, 10, 15, 30 мин. и т. д.), смотря по длительности перегрузки. Эта кратковременная перегрузочная мощность может зависеть от одного из трех указанных факторов (нагрев, электрические свойства и механическая конструкция) или может определяться ими совместно. Соотношение между длительной номинальной, кратковременной перегрузочной и мгновенной перегрузочной мощностью зависит от электрических свойств машины, примененного в машине сорта изоляции и механической конструкции двигателя.

Различные электроприводы в промышленности требуют разных соотношений трех указанных мощностей машин.

В большинстве случаев электродвигатели приходится выбирать практически по нагреву, а затем в приводах с колеблющейся нагрузкой проверять на мгновенную перегрузку. Однако имеются и такие электроприводы, в которых приходится выбирать двигатель, исходя из максимальных мгновенных нагрузок, и по ним уже получать номинальную мощность двигателя. Подобные приводы иногда могут работать в тепловом отношении недоиспользован-

ными. Получение наилучшего использования двигателя является одной из главнейших задач проектирования и эксплуатации. Мощность двигателя должна быть выбрана таким образом, чтобы он работал, по возможности, при наибольшей температуре, допускаемой для примененного в нем сорта изоляции. Превышение, хотя бы в одной точке изоляции машины, температуры над максимально допустимой ведет к порче изоляции и, следовательно, к выходу машины из строя или же в лучшем случае к уменьшению срока службы. Работа же изоляции при пониженной температуре обуславливает недостаточное использование машины, т. е. удорожание оборудования и увеличение потерь из-за худшего к. п. д. при работе машины.

С точки зрения допустимых температур—теплостойкости—все применяемые в электрических машинах изолирующие материалы согласно ГОСТ 183—41 (§§ 44—50) делятся на 5 классов.

«Класс изоляции «А»: хлопок, шелк, бумага и другие подобные органические материалы, пропитанные либо погруженные в масло, а также состав, называемый эмалью и применяемый при изготовлении эмалированной проволоки.

Класс изоляции «В»: изделия из слюды и асбеста, содержащие вяжущие вещества. Если совместно с изолирующими материалами класса «В» применены, с целью крепления, изолирующие материалы класса «А», то такую изоляцию можно отнести к классу «В» при условии, что ни электрические, ни механические свойства обмотки с такой изоляцией под действием температуры, допускаемой для материалов класса «В», не будут претерпевать изменений, которые могли бы сделать изолирующий материал непригодным для длительной работы.

Класс изоляции «ВС»: изделия из слюды, стеклянной пряжи и асбеста на теплостойких лаках.

Если совместно с изолирующими материалами класса «ВС» применены, с целью крепления, изолирующие материалы класса «А», то такую изоляцию можно отнести к классу «ВС» при условии, что ни электрические, ни механические свойства обмотки с такой изоляцией под действием температуры, допускаемой для класса «ВС», не будут претерпевать изменений, которые могли бы сделать изолирующий материал непригодным для длительной работы.

Класс изоляции «СВ»: изделия из слюды, стеклянной пряжи и асбеста на теплостойких лаках без применения изолирующих материалов класса «А».

Класс изоляции «С»: слюда и стеклянная пряжа без вяжущих веществ, фарфор, стекло, кварц и другие подобные материалы.

Изоляция, изготовленная из материалов разных классов. Если изоляция содержит изолирующие материалы разных классов (за исключением случаев, упомянутых при характеристике классов «В» и «ВС»), то температура каждого из этих материалов не

(ГОСТ 183—41)

Пределы допускаемы

№ по пор.	Части машины
1	а) Обмотки переменного тока турбогенераторов мощностью в 5000 квА и выше б) Обмотки переменного тока явнополюсных машин и асинхронных машин мощностью в 5000 квА и более или с длиной сердечника в один метр и более
2	а) Обмотки переменного тока машин более мелких, чем указанные в п. 1 б) Обмотки возбуждения (многослойные) машин постоянного тока и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в пп. 3 и 4 в) Якорные обмотки, соединенные с коллектором
3	а) Однорядные обмотки возбуждения б) Обмотки возбуждения турбогенераторов и стержневые обмотки роторов асинхронных машин при числе стержней в пазу не больше двух
4	Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев и компенсационные обмотки
5	Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя
6	Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя
7	Железные сердечники и другие части, не соприкасающиеся с обмотками
8	Железные сердечники и другие части, соприкасающиеся с обмотками
9	Контактные кольца как защищенные, так и незащищенные
10	Коллекторы
11	Подшипники скольжения
12	Подшипники качения

Таблица 1

и превышений температур

Изоляция класса „А“				Изоляция класса „В“			
Метод термометра	Метод сопротивления	Метод вложенных температурных детекторов		Метод термометра	Метод сопротивления	Метод вложенных температурных детекторов	
		между катушками в одном пазу	между поверхностью катушки и дном паза			между катушками в одном пазу	между поверхностью катушки и дном паза
—	—	65°C	55°C	—	—	85°C	75°C
60°C	65°C	—	—	75°C	85°C	—	—
70°C	70°C	—	—	95°C	95°C	—	—
—	70°C	—	—	—	95°C	—	—
65°C	65°C	—	—	85°C	85°C	—	—
65°C	—	—	—	85°C	—	—	—

Превышение температур этих частей ни в коем случае не должно достигать величины, которая создавала бы риск повреждения изолирующих или других смежных материалов

65°C — если изоляция обмоток принадлежит к классу „А“,

85°C — если изоляция обмоток принадлежит к классу „В“,

и при этом для изоляции листов активного железа применен соответствующий лак

70°C	—	—	—	90°C	—	—	—
65°C	—	—	—	85°C	—	—	—
45°C	—	—	—	45°C	—	—	—
60°C	—	—	—	60°C	—	—	—

должна превосходить допускаемую для него предельную температуру».

Учитывая чрезвычайное распространение электрических машин, разнообразные условия работы, разнородность типов, иногда недостаточно квалифицированный персонал, стандарт ГОСТ 183—41 устанавливает для всех электрических машин, работающих в СССР, предельную допустимую температуру охлаждающего воздуха в $+35^{\circ}\text{C}$. При более высоких температурах окружающей среды необходимы оговорки при заказе. Такая постановка вопроса ведет к слабому использованию машин при более низких температурах, чем 35°C , но зато дает огромные преимущества государственного и мирового масштаба как в отношении стандартизации, так и в отношении эксплуатации. На основании этого стандарт ГОСТ 183—41 устанавливает нормы «пределов допускаемых превышений температур» при предельной допустимой температуре охлаждающего воздуха для изолирующих материалов класса «А» и класса «В».

Для других классов изоляции, не упомянутых в табл. I, ГОСТ 183—41 дает следующие указания (§ 85): «Применение для обмоток изоляции из хлопка, шелка, бумаги и других подобных материалов без пропитки или погружения в масло не рекомендуется; в тех случаях, когда изоляция выполнена этим способом, пределы допускаемых превышений температур, указанные в табл. I для класса «А», должны быть снижены на 15°C .

Для обмоток, изолированных материалами класса «ВС», и соприкасающихся с ними железных сердечников и других частей пределы допускаемых превышений температур устанавливаются на 15°C больше пределов, указанных в табл. I материалов класса «В».

Для обмоток, изолированных материалами класса «СВ», пределы допускаемых превышений температур повышаются по сравнению с указанными в табл. I для материалов класса «В» соответственно повышению теплостойкости лаков, примененных при изготовлении изоляции класса «СВ».

Для изолирующих материалов класса «С» предела для превышения температуры не устанавливается.

Заметим, что номинальные мощности машин, выпускаемые нашими заводами, отнесены к стандартной температуре окружающей среды в $+35^{\circ}\text{C}$. Мощность стандартного двигателя при температуре окружающей среды больше $+35^{\circ}\text{C}$ будет меньше, а при температуре меньшей $+35^{\circ}\text{C}$ больше, чем указано на шитке машины.

Точный расчет изменения мощности при отклонении температуры окружающей среды от стандартной может быть сделан лишь электромашиностроительным заводом, так как он требует целого ряда данных машины. Для грубого ориентировочного подсчета могут служить следующие формулы.

Полагаем, что конечное превышение температуры машины над температурой окружающей среды пропорционально потерям в машине. В таком случае при допустимом для изоляции превышении температуры ϑ_N над стандартными 35°C получим

$$\vartheta_N = c \cdot (q_{NC} + q_{NV}) = c \cdot (q_{NC} + \alpha \cdot I_N^2),$$

где q_{NC} и q_{NV} — постоянные и переменные потери при номинальной нагрузке, а I_N — номинальный ток машины.

Обозначая отношение $q_{NC} : q_{NV} = a$, можем написать

$$\vartheta_N = c \cdot (a \cdot q_{NV} + q_{NV}).$$

При отклонении температуры окружающей среды от стандартной на величину $\Delta\vartheta$ допустимый в машине длительно ток $I_x = x \cdot I_N$ определится из равенства

$$\vartheta_N \pm \Delta\vartheta = c \cdot [q_{NC} + \alpha \cdot (x \cdot I_N)^2] = c \cdot (a \cdot q_{NV} + x^2 \cdot q_{NV}).$$

Деля эти равенства одно на другое, получим:

$$\frac{\vartheta_N \pm \Delta\vartheta}{\vartheta_N} = \frac{a \cdot q_{NV} + x^2 \cdot q_{NV}}{a \cdot q_{NV} + q_{NV}} = \frac{a + x^2}{a + 1},$$

откуда

$$x = \sqrt{\left(1 \pm \frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_N}\right)(a + 1) - a} = \sqrt{1 \pm \frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_N}(a + 1)}.$$

Если бы нагрузка рабочей машины на электропривод оставалась неизменной, то условия нагрева были бы единственным критерием для определения мощности двигателей. Однако огромное количество электроприводов работает при переменной нагрузке. Для подобных условий имеет значение как длительная, так и мгновенная перегрузочная мощность двигателя. Выбор мощности двигателя должен быть сделан с учетом как условий длительной работы, так и мгновенных перегрузок.

Старые электрические машины, предназначенные для длительного режима работы, с точки зрения нагрева, допускали в нагретом состоянии длительную перегрузку на 25% сверх номинальной в течение 1/2 часа и на 40% в течение 3 мин. Такой подход вел к тому, что большая часть двигателей в тепловом отношении нормально полностью не была использована. Температура изоляции в обычных условиях в них не достигала допустимого максимума. Ввиду того что большинство промышленных электроприводов в такой длительной перегрузке не нуждается, современная практика уже давно отказалась от длительной получасовой перегрузки по всем машинам, и выпускаемые в настоящее время машины никаких длительных перегрузок не допускают. Таким образом длительная мощность электрической машины обуславливается всецело ее нагревом при этой мощности. В тех особых случаях, когда для привода требуется некоторая ограниченная кратковременная перегрузка, при заказе должна быть сделана соответствующая оговорка.

Мгновенная перегрузочная (ударно допускаемая) мощность электродвигателя определяется электрическими свойствами маши-

ны и ее механической прочностью. В изготавливаемых для разных производственных условий конструкциях электроприводов механическая прочность практически не ставит обычно ограничений. Машины, работающие при ударной нагрузке (прокатные, крановые), изготавливаются механически усиленными. Практически предел мгновенной перегрузочной способности двигателя ставят электрические свойства машины.

Говоря о мгновенных перегрузочных свойствах электродвигателей, их характеризуют обычно отношением максимального мгновенно или весьма кратковременно допустимого перегрузочного момента M_{\max} к номинальному M_N

$$\lambda_M = \frac{M_{\max}}{M_N},$$

где M_N — момент, ограниченный нагревом при длительной работе. Коэффициент перегрузки λ_M называется перегрузочной способностью двигателя (по моменту) или сокращенно перегрузкой двигателя.

Выражая перегрузку в %, получим

$$\lambda_M \% = \frac{M_{\max}}{M_N} \cdot 100\%.$$

Допускаемая мгновенно перегрузка сверх номинального момента

$$\lambda'_M = \lambda_M - 1$$

или в %

$$\lambda'_M \% = (\lambda_M - 1) \cdot 100\%.$$

Перегрузка по току $\lambda_I = \frac{I_{\max}}{I_N}$ равна перегрузке по моменту

лишь в двигателях с постоянным магнитным потоком (например, в нерегулируемых током возбуждения шунтовых двигателях постоянного тока). В двигателях с меняющимся магнитным потоком $\lambda_M \neq \lambda_I$. Например, в серийных двигателях постоянного тока за счет увеличения магнитного потока $\lambda_M > \lambda_I$, в шунтовых двигателях с регулировкой скорости током возбуждения $\lambda_M < \lambda_I$.

Максимальная перегрузочная способность различных электрических двигателей зависит от разных факторов. Так, в двигателях постоянного тока мгновенная перегрузка определяется всецело условиями коммутации. Основным фактором, вызывающим искрение в машинах постоянного тока, является, как известно, реактивная э. д. с.

$$e_r = 2 \cdot \omega_s \cdot l \cdot AS \cdot \psi \cdot \zeta \cdot 10^{-8} \text{ В}, \quad (1)$$

где ω_s — число витков короткозамкнуемой секции; l — активная длина железа якоря в см; AS — линейная нагрузка в А на 1 см

длины окружности якоря; v — окружная скорость в см/сек; ζ — рассчитанное на 1 см длины железа якоря число линий потока рассеяния, сцепляющегося со всеми w витками короткозамкнутой секции при прохождении по последней тока силой в 1 А.

Так как в равенстве (1) $AS \equiv I$, $v \equiv n$, то для всякой машины постоянного тока

$$e_r = c \cdot I \cdot n, \quad (2)$$

где c — постоянная величина, определяемая конструктивными данными машины.

Очевидно, что значительное повышение I (а иногда и n) может сделать реактивную э. д. с. машины настолько большой, что машина начнет искрить. Расчетную перегрузку двигателей постоянного тока принимают обычно равной двум, хотя и при трех- а иногда и при четырехкратной мгновенной перегрузке получающееся искрение проходит почти без вреда для машины. При больших перегрузках двигатель постоянного тока не останавливается, но искрение может повредить коллектор и щетки. Реверсивные двигатели постоянного тока, предназначенные для очень тяжелых условий работы (прокатные реверсивные двигатели для прокатных станков), конструируются на мгновенную перегрузку по току, равную трех- и четырехкратной. На трех- четырехкратную перегрузку приходится конструировать и машины постоянного тока для привода отдельных секций бумагоделательной машины, из-за тяжелых условий пуска. Понятно, что указанное повышение перегрузочной способности двигателей получается за счет удорожания конструкции.

В шунтовых двигателях постоянного тока с регулировкой скорости током возбуждения при высших скоростях приходится допускать обычно меньшую перегрузку по току, чем при низших скоростях, как это вытекает из равенства (2).

Напряжение, приходящееся на две соседние коллекторные пластины двигателей постоянного тока, естественно, влияет на характер протекания коммутационных процессов. Поэтому при меньших напряжениях на коллекторе представляется возможным допускать большую перегрузку по току. Так, проект новой серии крановых двигателей постоянного тока завода «Динамо» предусматривает следующие допустимые по условиям коммутации перегрузочные токи в якоре в течение 1 мин. при полном токе возбуждения и при напряжении на зажимах двигателя U_0 (см. таблицу на стр. 42).

Отметим также, что конструкция крановых двигателей завода «Динамо» при непосредственной насадке на вал двигателя рабочей шестерни минимального возможного диаметра рассчитывается в соответствии с приведенной выше таблицей на $3M_N$ при напряжении на зажимах двигателя, равном U_N , и на $3,6M_N$ — при скорости, равной или меньшей, чем $0,2n_N$.

Тип двигателя	Допустимый перегрузочный ток	
	при $U_d = U_N$	при $U_d = 0,2 U_N$
Серийный . . .	3,0 I_N	3,5 I_N
Компаундный . .	2,7 I_N	3,2 I_N
Шунтовой . . .	2,5 I_N	3,0 I_N

При механическом соединении вала двигателя с редуктором соединительной муфтой, когда отсутствует изгибающий момент, допускается максимальное значение момента двигателя при $U_d = U_N$ и номинальной скорости n_N в $3,75 M_N$, а при скорости в $0,2 n_N$ — в $4,5 M_N$.

Необходимо отметить, что в силу худшего теплового использования закрытых машин по сравнению с открытыми, о чем речь будет дальше, мгновенная перегрузочная способность первых по отношению к номинальной мощности выше, чем у открытых. Краткое рассмотрение вопроса о нормировании условий коммутации машин дано в [Л. 33].

Перегрузочная способность асинхронных трехфазных двигателей чаще всего лежит в пределах от 2 до 2,5 — 3, иногда несколько выше и ограничена самими свойствами машины. При достижении этой перегрузки двигатель доходит до опрокидывающего момента и останавливается, если перегрузка своевременно не спадает, так как при переходе за опрокидывающее скольжение момент двигателя падает. Для трехфазных асинхронных двигателей с кольцами λ_M следует считать практически равной 2—2,5. Для обыкновенных короткозамкнутых двигателей они обычно несколько ниже, находясь в пределах от 1,8 до 2. О перегрузке двигателей типа Бушера и с глубоким пазом будет сказано позднее.

Если от асинхронного двигателя необходима большая перегрузка во время рабочего режима, то иногда приходится брать двигатель большей мощности, т. е. более дорогой, или устанавливать маховик.

Мгновенная перегрузочная способность синхронных двигателей составляет 2,5—3,5, доходя в некоторых конструкциях за счет удорожания машины до 4. Нормальная перегрузка обычно равна 2,5. Здесь, как и в асинхронных машинах, ограничение ставится самими свойствами машины, т. е. в данном случае синхронизирующей силой. При больших перегрузках машина может выпасть из синхронизма. Хотя максимальная перегрузка нормальных синхронных двигателей равна 2,5, однако, в силу свойств синхронной машины, такая перегрузка допустима лишь при постепенном приближении к ней. В этом отношении по сравнению со всеми остальными типами двигателей синхронный двигатель занимает особое положение. В то время как для всех типов двигателей перегрузочная способность остается практически одинаковой как при постепенной, так и мгновенной перегрузке, синхронные двигатели в силу свойств синхронного режима имеют разные значения перегрузочной способности при постепенном и мгновенном повышении нагрузки. При

этом величина допустимого пика зависит от величины исходной нагрузки. Так, испытания в лаборатории электропривода ЛПИ старых синхронных двигателей дали цифры, приведенные в таблице.

Приведенные весьма характерные цифры относятся к старым синхронным двигателям.

Современные типы синхронных двигателей допускают значительно большие толчки нагрузки, чем приведено в таблице. Так, некоторые двигатели допускают толчки нагрузки в 100—150% от P_N при исходной нагрузке в 200% от P_N . В целях повышения мгновенной перегрузки синхронного двигателя в случае его работы на пиковых приводах применяется автоматическое усиление его тока возбуждения в момент пика примерно на 30%. Более подробное рассмотрение этого вопроса будет сделано далее.

В коллекторных двигателях переменного тока предел мгновенной перегрузки практически ставится коммутацией. Здесь имеет значение результирующее действие трансформаторной и реактивной э. д. с. Однако, поскольку коллекторные машины являются асинхронными машинами, то в некоторых из них предел ставится опрокидывающим моментом. Перегрузочная способность коллекторных двигателей переменного тока зависит от положения щеток, в одних типах двигателях больше, в других—меньше. Среднее значение мгновенной перегрузочной способности этих двигателей лежит в пределах 2—2,5.

Необходимо отметить, что в ряде исполнительных механизмов допускаемые максимумы моментов двигателей могут ограничиваться чисто механическими соображениями, такими, как возможность соскальзывания со шкивов ремней, возможность обрыва или растягивания канатов, буксование колес передвигающихся тележек, не говоря уже о возможных поломках или чрезмерно быстрого изнашивания передач. В ряде случаев ограничения ставятся допустимыми ускорениями для людей (подъемники, лифты) или для самого механизма.

6. Нагревание двигателей при длительной неизменной нагрузке

Выше было указано, что основным фактором, определяющим допустимые условия работы того или другого двигателя в отношении нагрузки и степень его использования, является нагрев изоляции. Поэтому при подходе к методике выбора мощности двигателя для того или другого исполнительного механизма нужно проанализировать процесс нагрева двигателя в разных условиях. Мы начнем с простейшего случая выяснения закона нагревания двигателя при неизменной продолжительной его нагрузке.

Исходная нагрузка в % от P_N	Максимальная пиковая нагрузка в % от P_N	Допустимый толчок нагрузки в % от P_N
0	170	170
50	180	130
75	185	110
100	190	90
150	200	60

При работе двигателя в нем непрерывно выделяется тепло — результат неизбежных потерь, которые получаются при преобразовании электрической энергии в механическую (потери в железе, потери в меди, потери на трение). После пуска машины в ход с холодного состояния, т. е. с такого, при котором машина имеет температуру окружающей среды, температура машины начинает постепенно повышаться. Устанавливается температура машины лишь тогда, когда количество тепла, выделяемое в машине за единицу времени, будет равно тому количеству тепла, которое излучается машиной в окружающую среду за тот же период времени.

Тепловые процессы, происходящие в электрической машине, вообще очень сложны, вследствие ее неоднородности и изменения направления передачи тепловых потоков в разное время. Так, при холостом ходе обычно передается тепло от более нагретого железа менее нагретой меди. При нагрузке машины чаще имеет место обратное направление тепловых потоков. При изучении теплового процесса электрической машины отдельные ее части (например, якорь) обычно приходится принимать за однородное тело. Иначе задача теоретического определения изменения температуры становится почти неразрешимой. Это обстоятельство вносит ряд неточностей в окончательные выводы. Однако эти неточности могут быть прокорректированы опытом.

Условия нагревания отдельных частей машины, несущих на себе наиболее чувствительный к теплу материал — изоляцию, несколько отличны. Так, один характер нагрева будут иметь обмотки возбуждения (полюса) машин постоянного тока, другой характер — обмотки якоря. При работе таких машин с переменной нагрузкой практически наибольшее значение имеют условия нагревания якоря. Естественно, что в закрытых машинах условия нагревания обмотки возбуждения оказывают влияние и на нагревание обмотки якоря.

В асинхронных двигателях вследствие малого междужелезного пространства нагревание ротора оказывает непосредственное влияние на нагревание статора и обратно. Все это подчеркивает трудность теоретического рассмотрения вопроса. Особенно сложным оказывается процесс нагревания закрытых машин как без вентиляции, так и с таковой. Сюда, например, относятся двигатели краевого и металлургического типа.

Можно было бы двигатель разбить на ряд однородных частей и совокупно рассматривать результат влияния потерь в каждой из них. Так, например, проф. Шевалин, рассматривая нагревание тяговых двигателей, делит их на четыре отличных в тепловом отношении части. Однако все подобные теории так называемого многоступенчатого нагрева не дают практически результатов ввиду исключительной сложности тепловых процессов. Определение параметров отдельных уравнений и совместное решение уравнений тепловых режимов представляет значительные трудности.

Некоторое упрощение вопроса применительно к тяговым двигателям было дано Люком (Luke, J. 35), который предложил теорию двухступенчатого нагрева двигателей. Однако и эта теория не дает вполне надежных результатов для

определения температур закрытых двигателей. Лишь для вентилируемых двигателей результаты этого метода оказываются приемлемыми. Поэтому пользование теорией Люка на современной стадии ее развития для практических целей пока преждевременно. Требуется еще ряд дополнительных исследований и уточнений.

В свою очередь применение одноступенчатой теории нагрева, рассматривающей двигатель как однородное тело, также дает существенные неточности. Это обстоятельство требует внесения некоторых коррективов в одноступенчатую теорию нагрева с учетом теории эквивалентности. При этом всякий двигатель мыслится как эквивалентное ему в тепловом отношении некоторое вполне однородное тело. Температура же наиболее нагретых частей двигателя с точки зрения эквивалентности определяется по одноступенчатой теории нагрева. На этой основе мы и будем далее давать общие обоснования условий нагревания и охлаждения двигателей.

Переходим к рассмотрению нагревания двигателя при длительной неизменной нагрузке на базе теории нагрева машины как однородного тела.

Обозначим через Q количество тепла, которое выделяется в машине за единицу времени. Очевидно, что оно равно сумме потерь в машине или

$$Q = 0,24 \left(\frac{P_1}{\eta_1} - P_1 \right),$$

где P_1 — полезная мощность двигателя при рассматриваемой нагрузке в kW; η_1 — к. п. д. двигателя при нагрузке P_1 , а 0,24 — переводный множитель из киловатт в большие калории.

Далее обозначим через C — теплоемкость машины, т. е. количество тепла, которое необходимо сообщить машине для того, чтобы повысить ее температуру на 1°C , через A — теплоотдачу машины, т. е. количество тепла, которое отдается машиной в окружающую среду в $1''$ на 1° разности температур между окружающей средой и машиной, через ϑ — повышение температуры машины над окружающей средой.

Теплоотдача машины теоретически не остается постоянной. Она идет тремя путями: излучением, теплопроводностью и конвекцией. Разности температур пропорционально лишь тепло, отданное за счет теплопроводности. Конвекционное тепло пропорционально повышению температуры в степени 1,25. Что же касается излучения, то согласно закону Стефана Больцмана оно изменяется пропорционально 4-й степени разности абсолютных температур среды и излучающего тела. Однако при рассмотрении тепловых процессов машины отдачу тепла приходится для упрощения считать пропорциональной 1-й степени разности температур, так как главную роль здесь играет теплопроводность и конвекция.

Дифференциальное уравнение нагрева машины при неизменной нагрузке (неизменных потерях Q) имеет вид:

$$Q \cdot dt = A \cdot \vartheta \cdot dt + C \cdot d\vartheta. \quad (3)$$

Оно говорит, что количество тепла, выделенное в машине за элемент времени dt , равно количеству тепла, которое частично

отдано машиной в окружающую среду ($A \cdot \vartheta \cdot dt$) и которое частично пошло на повышение температуры самой машины ($C \cdot d\vartheta$). Решая это уравнение, имеем

$$(Q - A \cdot \vartheta) \cdot dt = C \cdot d\vartheta,$$

$$dt = \frac{C \cdot d\vartheta}{Q - A \cdot \vartheta}.$$

Интегрируя, получаем

$$t - t_0 = -\frac{C}{A} \ln(Q - A \cdot \vartheta),$$

где t_0 — подинтегральная постоянная, определяемая из начальных условий. При $t=0$ превышение температуры в общем случае $\vartheta = \vartheta_0$.

Очевидно, что

$$t_0 = \frac{C}{A} \ln(Q - A \vartheta_0),$$

откуда

$$t = \frac{C}{A} \cdot \ln \frac{Q - A \cdot \vartheta_0}{Q - A \cdot \vartheta}$$

или

$$\frac{Q - A \vartheta_0}{Q - A \vartheta} = e^{\frac{A}{C} \cdot t}$$

Производя дальнейшие преобразования, получаем для закона изменения повышения температуры экспоненциальную кривую

$$\vartheta = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{C/A}}\right) + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{t}{C/A}}. \quad (4)$$

Если в начальный период работы температура машины равнялась температуре окружающей среды, то $\vartheta_0 = 0$. В таком случае уравнение нагрева упрощается и получает вид

$$\vartheta = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{C/A}}\right). \quad (5)$$

Эта кривая представлена на фиг. 13. Из равенств (4) и (5) видно, что теоретически температура машины достигает конечного значения через бесконечно долгое время. Однако практически ее можно считать установившейся уже через промежуток времени $t = (4 \div 5) \frac{C}{A}$. Максимальное превышение температуры

$\vartheta_{\max} = \frac{Q}{A}$ (при $t = \infty$). В двигателях открытых малой мощности

и в двигателях с искусственной вентиляцией конечная температура достигается практически через 2—3 часа. В двигателях открытых средней и большой мощности равновесное состояние устанавливается через 4—8 час., а иногда и более. В двигателях закрытых максимальная температура получается после 7—12 час. непрерывной

работы. Величина $\frac{C}{A}$, представляющая отношение теплоемкости к теплоотдаче, для каждой машины при принятой нами теории одноступенчатого нагрева есть величина постоянная и от нагрузки машины не зависит. Она называется постоянной времени нагрева.

Мы ее будем обозначать буквой θ . Она имеет размерность времени и выражается практически в минутах или часах:

$$\left(\frac{C}{A}\right) \equiv \frac{\text{cal}}{\text{grad}} : \frac{\text{cal}}{\text{grad} \cdot \text{sec}} = \text{sec}.$$

Физически она представляет то время, в течение которого машина достигла бы максимального превышения температуры $\vartheta_{\max} = \frac{Q}{A}$, если бы не было отдачи тепла в окружающую среду. В самом деле,

$$\theta = \frac{C}{A} = \frac{C \cdot \vartheta_{\max}}{A \cdot \vartheta_{\max}} = \frac{C \cdot \vartheta_{\max}}{Q}. \quad (6)$$

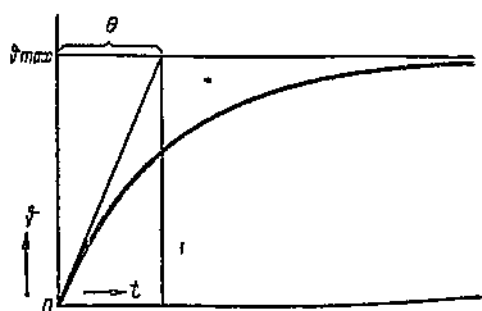
$C \cdot \vartheta_{\max}$ представляет то количество тепла, которое получит машина при отсутствии излучения в окружающую среду, нагреваясь от $\vartheta=0$ до ϑ_{\max} .

Q же представляет количество тепла, которое выделяется в машине в 1 сек. и при отсутствии излучения всецело идет на ее нагрев. Выражение (6) подтверждает правильность приведенного выше физического толкования θ .

Вместе с тем θ численно представляет то время, в течение которого машина при излучении тепла в окружающую среду достигает превышения температуры, равной $0,632 \vartheta_{\max}$. При $t=\theta$

$$\vartheta = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right) = \frac{Q}{A} \left(1 - \frac{1}{e}\right) = 0,632 \vartheta_{\max}.$$

Графически постоянная времени нагрева находится как отрезок асимптоты между касательной и экспоненциальной кривой нагрева



Фиг. 13. Кривая нагревания электродвигателя при длительной работе.

в какой-либо точке и вертикальной линией, проходящей через точку касания, (фиг. 13 и далее фиг. 16).

Постоянная времени нагрева θ имеет чрезвычайно важное значение для рассмотрения вопросов нагрева электродвигателей, а следовательно, и для определения их мощности. Постоянная времени нагрева тем больше, чем больше геометрические размеры машины, т. е. чем выше при данной номинальной скорости мощность машины или чем ниже скорость (число оборотов в минуту) при данной мощности.

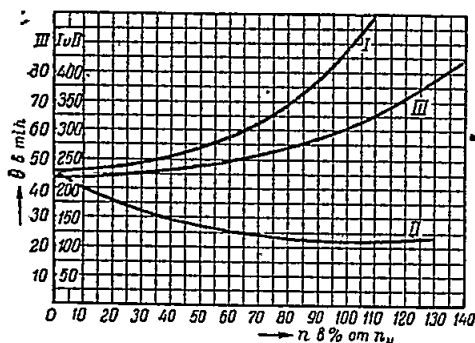
Мощность электрической машины

$$P = k \cdot D^2 \cdot l \cdot n,$$

где k — машинная постоянная, D и l — диаметр и активная длина железа вращающейся части машины, а n — номинальное число оборотов в минуту.

Так как при увеличении мощности машины теплоемкость растет пропорционально весу или объему машины, т. е. третьей степени геометрических размеров, отдача же тепла происходит через поверхность, возрастающую пропорционально второй степени геометрических размеров, то машина большей мощности имеет большую постоянную времени — θ . Двигатели закрытого типа имеют большее значение θ по сравнению с двигателями открытого типа, так как геометрические размеры закрытых двигателей больше.

Попутно отметим, что постоянную времени нагрева можно считать за величину неизменной лишь при режиме работы машины с маломеняющейся скоростью. При сильных изменениях скорости (серийный двигатель), при частых пусках и остановах приходится иметь дело с переменным значением θ . Для примера на фиг. 14 представлены кривые изменения θ в зависимости от скорости в различных типах трамвайных двигателей, для которых эти вопросы ввиду меньшего числа применяю-



Фиг. 14. Изменение постоянной времени нагрева θ в зависимости от скорости для серийных трамвайных двигателей с различными условиями вентиляции.

щихся типов изучены более детально. Кривые показывают, как влияет система вентиляции на изменение θ в зависимости от скорости. Кривая I относится к закрытым двигателям, II — к двигателям с самовентиляцией, III — к двигателям с независимой вентиляцией.

В машинах с самовентиляцией постоянные времени нагрева в неподвижном состоянии (θ_0) всегда больше, чем при вращении

(θ), так как теплоотдача неподвижной машины A меньше, а $\theta = \frac{C}{A}$. Обычно можно считать, что

$$\theta_0 = (1,2 - 1,4) \theta.$$

Способы экспериментального определения теплоотдачи A в зависимости от скорости разработаны инж. Барским [Л. 40].

7. Значение постоянных времени нагрева для вращающихся и неподвижных машин

Полученное нами уравнение нагрева машины (5) выведено при условии, что машина является однородным телом. Если бы мы разбили двигатель на n отдельных частей (многоступенчатая теория нагрева), то нагрев двигателя выразился бы уравнением с числом показательных функций, равным n , причем каждая показательная функция имела бы свою постоянную времени нагрева θ ,

$$\theta = \theta_0 + C_1 \cdot e^{-\frac{t}{\theta_1}} + C_2 \cdot e^{-\frac{t}{\theta_2}} + \dots + C \cdot e^{-\frac{t}{\theta_n}} + \dots \\ \dots + C_{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_{n-1}}} + C_n \cdot e^{-\frac{t}{\theta_n}}$$

Применяя одноступенчатую теорию нагрева, мы должны особенно интересоваться постоянной времени нагрева той части, которая может быть наиболее уязвимой. В машинах постоянного тока это будет якорь, в синхронных машинах — статор, в асинхронных машинах (коллекторных и бесколлекторных) — как статор, так и ротор, в температурном отношении сильно влияющие друг на друга. Постоянные времени нагрева указанных частей, наиболее важные для практических условий эксплуатации машины, на практике часто называют просто постоянными времени нагрева машины. Поэтому при отсутствии соответствующих оговорок под постоянными времени нагрева машины следует понимать соответствующие постоянные частей, указанных выше.

Постоянные времени нагрева для открытых машин диаметром якоря до 600 мм составляют от 1 до 1,5 часа и от 1,5 до 2,5 часа для машин диаметром от 600 до 2000 мм. Как явствует из предыдущего, большие значения относятся к большим машинам. Для машин закрытого типа с диаметром якоря до 400 мм $\theta = 1,5 - 3,5$ часа и $\theta = 3,5 - 5$ час. для якорей от 400 мм до 660 мм. Для двигателей малых мощностей открытого типа постоянную времени нагрева можно принимать от 1 до 2 час., для двигателей закрытого типа от 2 до 5 час. в зависимости от габарита. В машинах с искусственной вентиляцией вследствие большего значения теплоотдачи, θ имеет величину от 0,6 до 1,6 часа.

Как уже отмечено выше, указанные цифры дают значения постоянных времени нагрева якорных обмоток двигателей постоянного тока и синхронных, а также статорных и роторных обмоток асинхронных двигателей. Шунтовые обмотки возбуждения, питаемые постоянным током, имеют постоянные времена нагрева от 1,5 до 2,7 часа. В машинах постоянного тока при расчетах приходится иметь дело с несколькими постоянными времени нагрева; однако первенствующее значение имеет нагрев якоря. В машинах же закрытых (или асинхронных как коллекторных, так и индукционных) нагрев одной обмотки сильно сказывается на нагреве другой. Поэтому в теории нагрева и теории привода в зависимости от типа машины приходится иметь дело или с некоторой постоянной времени нагрева, средней для всех обмоток, или с постоянной времени нагрева обмотки якоря.

Постоянные времена нагрева машины имеют чрезвычайно большое значение для определения мощности электродвигателей при переменном режиме работы. Поэтому следует считать желательным, чтобы электромашиностроительные заводы СССР в своих каталогах приводили значения постоянных времени нагрева отдельных обмоток. Детальный расчет нагрева машин представляет весьма сложную задачу [Л. 36 и 40].

Опыт показывает, что для двигателей переменного тока теплоотдача при пониженной скорости примерно в два раза меньше по сравнению с теплоотдачей при номинальной скорости и равна примерно $1/4$ теплоотдачи в покое. Соответствующие цифры для двигателей постоянного тока 0,75 — для пониженной скорости и 0,5 — для покоя. Очевидно, что в этом отношении должны быть повышены постоянные времена нагрева для неподвижных или с пониженной скоростью вращающихся двигателей.

8. Изменение температуры двигателя при различных длительных нагрузках

Если машина работает длительно при некоторой нагрузке P_n с потерями Q_n при условии $\vartheta_0 = 0$, то рост температуры от холодного состояния к нагретому происходит по закону экспоненциальной кривой

$$\vartheta = \frac{Q_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{\vartheta}} \right).$$

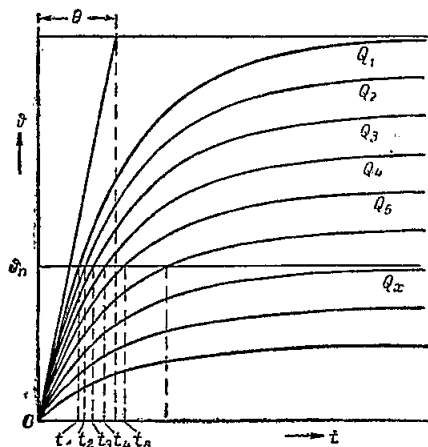
Наибольшая достижимая температура при установившемся равновесии будет равна

$$\vartheta_{max} = \frac{Q_n}{A}.$$

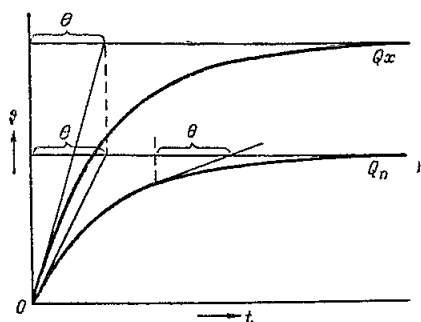
Если мы рассмотрим рост температуры двигателя при разных режимах продолжительной работы (т. е. при нагрузках $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$) и соответствующих им потерях $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$, то мы

получим семейство экспоненциальных (логарифмических) кривых с одной и той же постоянной времени нагрева $\theta = \frac{C}{A}$. Это семейство представлено на фиг. 15.

Касательные к любой точке каждой из этих кривых и вертикали, проведенные из этих точек, будут отсекают на соответствующих асимптотах один и тот же отрезок, равный постоянной времени нагрева θ (фиг. 16). Очевидно, что допустимые для машины длительные потери Q_x мы получим, проведя горизонталь-



Фиг. 15. Семейство экспоненциальных кривых нагрева при разных нагрузках.



Фиг. 16. Графическое нахождение постоянной времени нагрева.

ную прямую, отстоящую от оси абсцисс (фиг. 15) на расстоянии $\vartheta_{\max} = \vartheta_N$, где ϑ_{\max} — максимальное допустимое превышение температуры для примененной в машине изоляции. При длительных потерях $Q < Q_x$, т. е. при $P < P_x$, машина будет недогружена, при $Q > Q_x$, т. е. при $P > P_x$, машина в тепловом отношении будет перегружена. При мощности $P > P_x$ машина длительно работать не может. При $P > P_x$ она может работать лишь ограниченный промежуток времени, например, t_4 при потерях Q_4 и притом если нагрузка начата с холодного состояния машины. В противном случае при длительности работы $t = t_4$ и при потерях Q_4 машина уже перегреется.

Если речь идет о длительных нагрузках $Q < Q_x$, то независимо от того, с какой начальной температуры машина начинает работать, конечная температура машины будет соответствовать максимуму той экспоненциальной кривой, которая относится к данной нагрузке. Далее, независимо от начального превышения температуры ϑ_0 изменение температуры будет происходить по закону именно этой экспоненциальной кривой. Поясним вышесказанное примером. В самом деле,

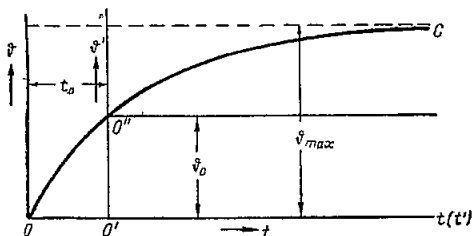
$$\vartheta = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right) + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\theta}}. \quad (4)$$

При $t = \infty$ мы получаем $\vartheta_{\max} = \frac{Q}{A}$ независимо от того, равно ли ϑ_0 нулю или нет. Далее докажем, что уравнение (5)

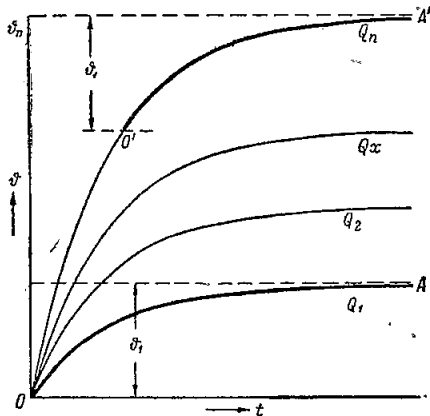
$$\vartheta = \frac{Q}{A} (1 - e^{-\frac{t}{\theta}}) \quad (5)$$

получается из (4) простым переносом начала координат из точки O' в точку O с координатами $(-t_0$ и $0)$, где (фиг. 17)

$$t_0 = \theta \cdot \ln \frac{\vartheta_{\max}}{\vartheta_{\max} - \vartheta_0}$$



Фиг. 17. Кривая нагрева машины при $\vartheta_0 \neq 0$.



Фиг. 18. Семейство экспоненциальных кривых нагрева одной и той же машины при разных нагрузках.

Подставляя в (4) $\vartheta = \vartheta'$ и $t = t' \cdot t_0$, получаем

$$\vartheta' = \frac{Q}{A} (1 - e^{-\frac{t' - t_0}{\theta}}) + \frac{Q}{A} (1 - e^{-\frac{t_0}{\theta}}) \cdot e^{-\frac{t' - t_0}{\theta}},$$

так как

$$\vartheta_0 = \frac{Q}{A} (1 - e^{-\frac{t_0}{\theta}}),$$

откуда

$$\vartheta' = \frac{Q}{A} - \frac{Q}{A} e^{-\frac{t' - t_0}{\theta}} + \frac{Q}{A} \cdot e^{-\frac{t' - t_0}{\theta}} - \frac{Q}{A} \cdot e^{-\frac{t' - t_0}{\theta}} = \frac{Q}{A} (1 - e^{-\frac{t'}{\theta}}),$$

что и подтверждает вышеизложенное.

Аналогично можно показать, что уравнение

$$\vartheta = \vartheta_k (1 - e^{-\frac{t}{\theta}})$$

получается из уравнения

$$\vartheta = \vartheta_n (1 - e^{-\frac{t}{\theta}})$$

при условии, что $\vartheta_k < \vartheta_n$. Таким образом экспоненциальные кривые, соответствующие потерям Q_1, Q_2, \dots, Q_x , являются верхней частью экспоненциальной кривой той же машины с наибольшими потерями (недопустимыми для машины длительно) — Q_n . На фиг. 18 соответствующие части двух экспоненциальных кривых (для Q_1 и Q_n) показаны жирными линиями.

9. Охлаждение машины при отсутствии нагрузки и изменение температуры машины при любой нагрузке

Дифференциальное уравнение охлаждения машины получится, если мы положим в (3) $Q=0$. Уравнение (3) тогда получит вид

$$A' \cdot \vartheta \cdot dt + C \cdot d\vartheta = 0 \quad (7)$$

или

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta} = -\frac{A'}{C} \cdot dt.$$

Интегрируя, имеем

$$\ln \vartheta - \ln \vartheta_x = -\frac{t}{C} = -\frac{t}{\theta'},$$

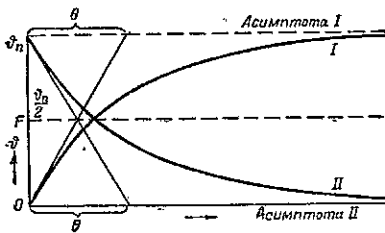
где $\ln \vartheta_x$ — подинтегральная постоянная.

Нужно иметь в виду, что в общем случае теплоотдача двигателя в покое, как было отмечено выше, не та, что при вращении. Поэтому постоянная времени нагрева в уравнении для охлаждения θ' не та, что в уравнении для нагрева. Они совпадают лишь в том случае, если машина охлаждается, идя с той же скоростью, что и при нагрузке (например, работа шунтового или синхронного двигателя вхолостую). В случае остановки двигателя или в случае его работы при переменной скорости (серьезный двигатель) должно быть учтено все сказанное выше. В начале охлаждения при $t=0$ $\vartheta = \vartheta_n$. Следовательно, $\ln \vartheta_x = \ln \vartheta_n$, откуда

$$\ln \frac{\vartheta}{\vartheta_n} = -\frac{t}{\theta'}; \quad \vartheta = \vartheta_n \cdot e^{-\frac{t}{\theta'}}. \quad (8)$$

Если считать постоянной θ для нагрева и охлаждения одной и той же, то из сопоставления равенств (5) и (8) видно, что кривая охлаждения (кривая II, фиг. 19) будет представлять зеркальное отражение экспоненциальной кривой нагрева (на фиг. 19) относительно оси, параллельной оси абсцисс и проходящей через точку F с ординатой $\frac{\vartheta_n}{2}$. Асимптотой кривой охлаждения служит ось абсцисс. Как и в случае нагрева, охлаждение машины до температуры окружающей среды длится бесконечно долгое время. Практически уже после периода $t = (4 \div 5) \theta$ температура машины достигает температуры окружающей среды.

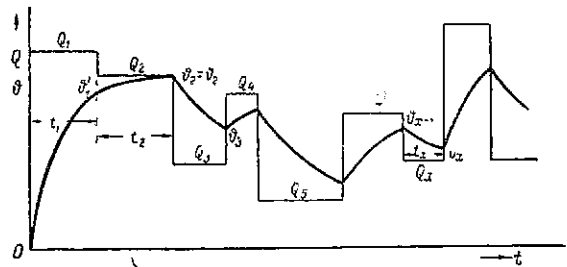
Опять-таки, независимо от той температуры, до которой машина была предварительно нагрета, охлаждение ее происходит всегда по одной и той же кривой, если допустить неизменность постоянной нагрева θ .



Фиг. 19. Кривые нагрева и охлаждения электродвигателя.

ния, т. е. с $\theta_0 = 0$. Для вычисления температурной кривой нужно кроме графика потерь знать постоянную времени нагрева θ и теплоемкость A . Для удобства построения и выяснения физических процессов выберем масштаб температур особым образом. При длительной нагрузке с потерями Q_k мы будем иметь $\theta_k = \theta_{k \max} = \frac{Q_k}{A}$.

Выберем масштаб температур μ_θ так, чтобы $\mu_\theta = \frac{\mu_Q}{A}$. В таком случае θ_k и Q_k представятся одной ординатой. При этом, если машина будет длительно работать при потерях Q_2 , то температура ее достигнет $\theta_{2 \max}$ в выбранном масштабе равной ординате Q_2 . Значение такого выбора масштаба будет выяснено в дальнейшем.



Фиг. 20. Изменение температуры электродвигателя при переменной нагрузке.

Обозначим через $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ максимальные температуры, которых достигала бы машина при длительных нагрузках с потерями Q_1, Q_2, \dots, Q_n . Обозначим через $\theta'_1, \theta'_2, \dots, \theta'_n$ действительно полученные температуры в конце 1, 2, \dots , n периодов.

Тогда

$$\left. \begin{aligned} \theta'_1 &= \frac{Q_1}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\theta}} \right), \\ \theta'_2 &= \frac{Q_2}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\theta}} \right) + \theta'_1 e^{-\frac{t_2}{\theta}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Из фиг. 20 видно, что в конце второго промежутка цикла температура машины достигла ϑ'_3 , в данном частном случае равной ϑ_3 , т. е. соответствующей длительной работе машины при потерях Q_3 и численно равной $\vartheta_3 = \frac{Q_3}{A}$. Если бы машина работала длительно при потерях Q_3 , то температура машины достигла бы величины $\vartheta_3 = \frac{Q_3}{A}$. При выбранном нами масштабе ординат $\vartheta_3 = Q_3$. Следовательно, после окончания второго периода машина будет стремиться к температуре ϑ_3 . Так как $\vartheta'_2 > \vartheta_3$, то, несмотря на существование в машине потерь, машина до восстановления теплового равновесия будет охлаждаться. Количество тепла, излучаемое машиной при этом в окружающую среду, будет сначала больше тепла, выделяемого в машине.

Математически превышения температуры выражаются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \vartheta'_3 &= \frac{Q_3}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\theta}} \right) + \vartheta'_2 \cdot e^{-\frac{t_3}{\theta}}, \\ \vartheta'_4 &= \frac{Q_4}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_4}{\theta}} \right) + \vartheta'_3 \cdot e^{-\frac{t_4}{\theta}}, \\ &\dots \dots \dots \\ \vartheta'_n &= \frac{Q_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{\theta}} \right) + \vartheta'_{n-1} \cdot e^{-\frac{t_n}{\theta}}. \end{aligned} \right\} \quad (9')$$

Повышается ли температура двигателя за определенный промежуток времени или понижается, это зависит всецело от того, выше ли Q_x , чем ϑ'_{x-1} , или ниже. Если при выбранном нами масштабе $\vartheta_{x-1} < Q_x$, происходит дальнейший нагрев машины, если $\vartheta_{x-1} > Q_x$, происходит охлаждение машины.

Поскольку, как это было установлено в п. 8 (рис. 18), нагрев машины независимо от величины нагрузки происходит по верхней части одной и той же экспоненциальной кривой, взятой для максимальной нагрузки (то же можно сказать и относительно кривой охлаждения), то для примерных (неточных) подсчетов температур может быть применен графический метод. Для его использования необходимо построение шаблона экспоненциальной кривой с постоянной времени нагрева, равной таковой для данной машины. Масштаб для температур в шаблоне подбираем таким образом, чтобы ϑ_N , т. е. допускаемое нормами превышение температуры для примененного в машине класса изоляции, равнялось графически Q_N , где Q_N — потери в машине при номинальной нагрузке. Однако для выполнения графического построения шаблон нужно построить не для ϑ_N , а для недостижимой практически температуры ϑ_{\max} .

соответствующей Q_{\max} , т. е. максимальным потерям графика. Из уравнения кривой нагрева ясно, что

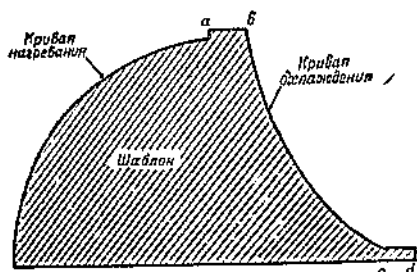
$$\frac{\vartheta_{\max}}{\vartheta_N} = \frac{Q_{\max}}{Q_N}.$$

Следовательно,

$$\vartheta_{\max} = \vartheta_N \cdot \frac{Q_{\max}}{Q_N}.$$

Масштаб времени на шаблоне должен быть одинаков с масштабом времени на графике потерь.

Шаблон экспоненциальной кривой (для нагрева—левая часть, для охлаждения—правая) показан на фиг. 21.



Фиг. 21. Шаблон для построения кривых нагрева и охлаждения.

Асимптоты кривых показаны на шаблоне горизонтальными отрезками прямых ab —для нагрева, cd —для охлаждения. Шаблон построен лишь для промежутка времени, равного 50, так как при $t=50$ максимум кривой отстоит от ее асимптоты всего лишь на 0,5% ϑ_{\max} .

В самом деле,

$$\vartheta = \vartheta_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right) = \vartheta_{\max} \left(1 - \frac{k}{100}\right).$$

Значения $\frac{t}{\theta}$ 2,3 3 3,22 3,51 3,91 4,6 5,3

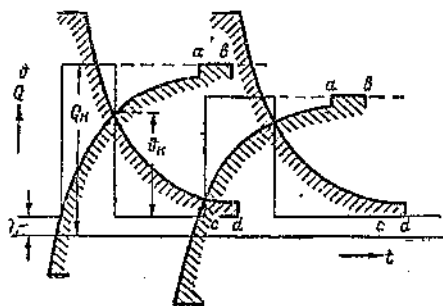
» k (в%) 10 5 4 3 2 1 0,5.

Из предыдущего ясно, что при постоянном значении θ одной и той же кривой (нагрева) можно было бы пользоваться и для нагрева и для охлаждения. Однако для удобства пользования (во избежание перевертывания шаблона) шаблон сделан двойной—для нагрева и для охлаждения.

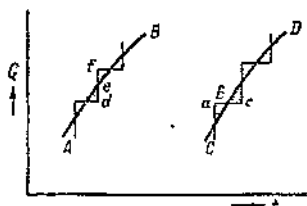
При пользовании шаблоном нужно иметь в виду следующее. Каждый шаблон строится для определенной машины—с определенной постоянной времени нагрева θ . Масштаб времени на графике потерь должен быть тот же, что и на шаблоне. Оба эти условия являются обязательными.

Однако принципиально одним и тем же шаблоном можно пользоваться для всех двигателей с разными постоянными времени нагрева, если при другом θ по сравнению с принятым при построении шаблона принимать масштаб времени графика потерь не тот, который был взят при построении шаблона, а измененный в отно-

шении $\frac{\theta'}{\theta}$, где θ' — постоянная времени нагрева, с которой приходится иметь дело в данном случае, а θ — постоянная, для которой первоначально построен шаблон. Таким образом при увеличении постоянной времени нагрева в 1,7 раза нужно увеличить масштаб времени как по оси абсцисс шаблона, так и по оси графика потерь в 1,7 раза. Понятно, что при этом на шаблоне и графике получается обычно неудобный масштаб времени, почему практически одним шаблоном можно пользоваться лишь при постоянных времени нагрева, находящихся в целом отношении (например, 1 час и 2 часа; масштаб времени при этом меняется в два раза).



Фиг. 22. Способ пользования шаблоном.



Фиг. 23. Замена плавной кривой эквивалентной ступенчатой.

Способ пользования шаблоном показан на фиг. 22. Прикладываем шаблон так, чтобы он проходил через точку ϑ_x , где ϑ_x — начальное превышение температуры того периода, в течение которого потери (т. е. нагрузка) остаются постоянными, и располагаем его так, чтобы асимптота ($a-b$) шаблона совпала с линией (или продолжением) Q_{x+1} . Если $\vartheta_x > Q_{x+1}$, то нужно пользоваться правой частью шаблона (для охлаждения). Если $\vartheta_x < Q_{x+1}$, то нужно пользоваться левой частью шаблона (для нагрева). Таким образом мы можем получить изменение температуры в машине при любом графике работы как аналитически, так и графически, не проходя последовательно весь период.

Если график нагрузки, а следовательно, и потерь представляет кривую линию, то его можно заменить отрезками перпендикулярных линий (фиг. 23) так, чтобы получить равновеликую площадь, т. е. добиться равенства горизонтальных или вертикальных отрезков $ab=bc$ или $de=ef$.

Напомним еще одно обстоятельство. Выше было отмечено, что в машинах с сильным изменением скорости с нагрузкой постоянная времени меняется с изменением скорости. Поэтому здесь нужно пользоваться шаблоном со средней постоянной времени нагрева θ_m . Точно так же при остановках машины нужно пользоваться постоянной времени нагрева неподвижной машины θ_0 .

10. Возможные режимы работы исполнительных механизмов и электропривода и основная классификация этих режимов на базе длительности нагрузки

Число разнородных исполнительных механизмов разных отраслей промышленности, приводимых в движение электродвигателями, исключительно велико. Весьма разнообразны и режимы работы электропривода. Детальная обобщающая классификация исполнительных механизмов и их режимов работы в тех направлениях, которые имеют значение для проектирования и эксплуатации электропривода, будет дана позднее в гл. V, рассматривающей вопросы нагрузочных диаграмм и переходных режимов. Здесь же мы коснемся пока лишь основной классификации режимов, применяемой в настоящее время, в том объеме, в каком это важно с точки зрения уяснения основных методов определения мощности электродвигателей по нагреву.

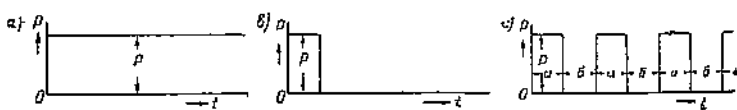
Отдельные исполнительные механизмы и вращающие их двигатели в зависимости от характера производства, конструкции исполнительного механизма, его роли в производственном процессе могут работать: 1) или очень длительные периоды времени, измеряющиеся несколькими часами, сменами, сутками и даже неделями и месяцами (например, двигатели и механизмы на насосных станциях, конвейеры непрерывного транспорта и т. д.); 2) или короткие промежутки времени, измеряющиеся несколькими минутами, десятками минут и т. п. (например, двигатели разводных пролетов мостов, шлюзов, установочные механизмы на некоторых станках и т. д.). Такие относительно короткие промежутки работы следуют обычно после длинных пауз, длительностью в несколько часов, а иногда и несколько десятков часов; 3) наконец возможна работа исполнительного механизма с непрерывно чередующимися периодами вращения и остановки или нагрузки и холостого хода. Типичным примером таких механизмов являются краны и лифты.

Во всех трех перечисленных категориях работы тепловые условия для двигателя оказываются неодинаковыми. Работа двигателя во всех случаях обуславливает потери в нем при превращении электрической энергии в механическую или обратно. В первом случае эти потери в двигателе выделяются непрерывно, во втором случае лишь в течение короткого периода работы. В третьем случае нагрев двигателя имеет место во время периодов работы, охлаждение—во время остановок или пауз. Характер тепловых процессов, происходящих в двигателях, во всех трех случаях оказывается различным. Не совсем одинакова и методика выбора мощности двигателя в этих разных условиях.

В соответствии с условиями нагрева двигателей различают три основных режима их работы.

1. *Продолжительный (длительный) режим работы.* При этом режиме работы рабочий период настолько велик, что нагрев ма-

шины достигает своего установившегося состояния. График изменения мощности электропривода для такого режима работы представлен на фиг. 24а. Работа электродвигателя в этом режиме может начинаться с любого предварительного температурного состоя-



Фиг. 24. Различные режимы работы электропривода.
а—длительный; б—кратковременный; в—повторно-кратковременный.

ния машины. Конечное значение превышения температуры будет соответствовать всегда установившемуся для этой нагрузки значению.

2. *Кратковременный режим работы.* Под кратковременной работой машины понимается такая работа, в течение которой нагрев машины не достигает установившегося для данной нагрузки температурного состояния, а перерыв в работе машины достаточно велик для того, чтобы при возобновлении работы температура машины не отличалась от температуры охлаждающей среды. Упрощенный график нагрузки в таком режиме показан на фиг. 24б. Работа машины в этом режиме начинается с холодного состояния машины.

3. *Повторно-кратковременный (прерывистый) режим работы.* Повторно-кратковременной работой называется такая работа, при которой рабочие периоды регулярно (или нерегулярно) чередуются с периодами остановки или работы без нагрузки — «промежутками» (например, двигатели для кранов, подъемно-транспортных машин). Общая продолжительность одного рабочего периода с одним «промежутком» не должна превосходить 10 мин. Идеальный график нагрузки при таком режиме работы представлен на фиг. 24с. Машины, предназначенные для подобного режима работы, как и машины длительного режима работы, должны быть в состоянии работать совершенно неограниченное время, опять-таки независимо от начальной исходной температуры.

Поскольку условия нагревания машин в трех перечисленных режимах различны, то несколько отличается и методика выбора мощности двигателя для каждого из отмеченных режимов. Вопрос осложняется тем, что графики нагрузки, приведенные на фиг. 24, в чистом виде (кроме фиг. 24а) не встречаются. Большая часть исполнительных механизмов работает при непрерывно меняющейся нагрузке. В качестве примеров можно указать хотя бы прокатный стан, строгальный станок, буровой станок в нефтяной промышленности, ткацкий станок, вальцы в резиновой промышленности, шаровые мельницы — в цементной и т. д.

В рабочий период повторно-кратковременного и кратковременного режимов естественно входит и пусковой и тормозной процес-

сы, когда нагрузка двигателей также не остается постоянной. Все это осложняет условия выбора мощности двигателя по нагреву для разных исполнительных механизмов. К изучению этого вопроса мы подойдем таким образом. Рассмотрим сначала методику выбора мощности двигателя по нагреву для любого заданного характера изменения нагрузки. Способы подсчета меняющихся моментов нагрузки будут разобраны по методическим соображениям несколько позднее.

Далее, исходя из общего метода, пригодного для всех случаев, рассмотрим особенности практического выбора мощности двигателей для кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы.

II. Выбор мощности двигателя при продолжительной неизменной или весьма мало меняющейся нагрузке.

Выбор мощности (габарита) двигателя для длительной неизменной или весьма мало меняющейся нагрузки, равной приблизительно P , принципиально весьма прост. Если мы возьмем двигатель номинальной мощности P , то этот двигатель будет работать с длительной нагрузкой в P кВт как раз при наибольшей допустимой для примененной в нем изоляции температуре, ибо завод, выпускающая двигатель, естественно, стремится достигнуть максимального его использования. Поскольку нагрузка в рассматриваемом случае постоянная, никакой проверки на нагрев и перегрузку во время работы для выбранного типа двигателя не требуется. Исключительно редкий в данном случае пусковой период, когда нагрузка на двигатель обычно больше P кВт, совершенно недостаточен в рассматриваемых условиях, чтобы перегрузить двигатель. В случае тяжелых условий пуска необходимо лишь проверить достаточность развиваемого двигателем пускового момента.

Исполнительных механизмов, работающих в таких условиях, довольно много во всех отраслях промышленности. Для примера укажем центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры, конвейеры непрерывного транспорта, банкаброши в текстильной промышленности, дезинтеграторы в металлургической промышленности, дымососы на электрических станциях, каландры в резиновой, бумажной, текстильной промышленности, бумагоделательные машины, текстильные отделочные агрегаты и т. д.

Однако чисто теоретическое определение мощности двигателя возможно лишь для весьма ограниченного числа рабочих машин. Наиболее типичными примерами могут служить насос и вентилятор.

Мощность двигателя для насоса P в кВт

$$P = \frac{Q \cdot \delta \cdot H}{102 \cdot \eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{пер}}}, \quad (10)$$

где Q — количество нагнетаемой жидкости в m^3/sec ; δ — удельный вес жидкости в kg/m^3 ; H — полная высота подачи в m , равная $H_1 + H_2 + H_3$, где H_1 — высота всасывания; H_2 — высота нагнетания жидкости; H_3 — напор. Высота H_3 включает в себя также сопротивления труб и вентиляей. Произведение $Q \cdot \delta \cdot H$ представляет полезную работу в kgm , в sec . 102 — переводный множитель из килограммометров в киловатты, $\eta_{нас}$ и $\eta_{пер}$ — к. п. д. насоса и к. п. д. передачи от двигателя к насосу. Коэффициент полезного действия поршневых насосов обычно равен 0,85 — 0,9, центробежных насосов высокого давления 0,6 — 0,75, центробежных насосов низкого давления 0,2 — 0,6.

К числу таких же легко определяемых по мощности электроприводов относится вентилятор. Мощность двигателя для него в киловаттах,

$$P = \frac{Q \cdot h}{102 \cdot \eta_{вент} \cdot \eta_{пер}}, \quad (11)$$

где Q — количество всасываемого или нагнетаемого воздуха в m^3/sec ; h — давление или разрежение в mm вод. ст.

Так как 100 mm вод. ст. соответствуют 0,01 at , то $Q \cdot h$ представляет собой работу в килограммометрах в единицу времени или мощность, ибо

$$(Q \cdot h) = \frac{\text{m}^3}{\text{sec}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}.$$

Коэффициент полезного действия мощных шахтных вентиляторов составляет от 0,73 до 0,83, для вентиляторов средней мощности от 0,4 до 0,55 и, наконец, для малых комнатных вентиляторов от 0,2 до 0,35.

Заметим, что поскольку мы должны определить полезную мощность двигателя, указываемую на его щитке, а не подведенную, к. п. д. двигателя в двух только что приведенных формулах не фигурирует.

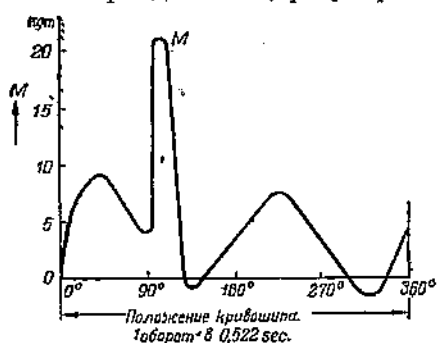
Почти во всех остальных случаях приходится прибегать или к более сложным теоретическим подсчетам для определения мощности двигателя или к эмпирическим формулам, основанным на результатах большого количества исследований. Причины необходимости применения эмпирических формул заключаются в том, что при современном состоянии наших познаний мы еще не умеем точно учитывать работу всех производственных механизмов и получающихся в них потерь. В приведенных выше двух простых теоретических формулах (10) и (11) точно так же фигурировали по существу опытные к. п. д. До сих пор мы не умеем совершенно точно и для всех случаев теоретически подсчитывать работу трения, а в некоторых рабочих машинах, например, в текстильных, она часто составляет главную и основную затрату энергии.

Однако к настоящему времени в связи с длительностью работы электрического привода в промышленности и возможностью постановки точных и простых исследований при одиночном приводе пишущими приборами и осциллографами уже скопился достаточный опыт, который дает возможность во многих случаях определять потребную для рабочих машин мощность по надежным эмпирическим формулам.

Считаем необходимым еще раз оговориться, что в данном параграфе мы пока рассматриваем лишь машины, работающие при мало меняющейся нагрузке. В случае машин с резкими циклическими изменениями нагрузки вопрос несколько осложняется, но об этом будет сказано дальше.

12. Принципиальное обоснование выбора мощности двигателя для любого переменного режима работы.

Чрезвычайно большое количество исполнительных механизмов имеет периодический, регулярный и нерегулярный график. В течение



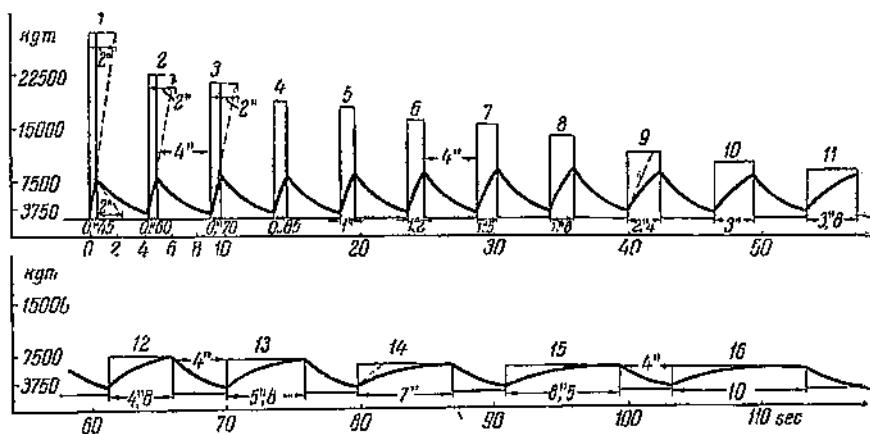
Фиг. 25. График моментов сопротивления ткацкого станка.

каждого цикла-периода мощность двигателя изменяется по какому-то определенному закону. Так, для примера на фиг. 25 представлен график моментов, требуемых ткацким станком за один цикл, т. е. за время прохождения батана взад и вперед от некоторого крайнего положения. На фиг. 26 представлен график *моментов* прокатного нереверсивного стана (тонкая линия) и график *моментов* приводящего его двигателя (жирные линии) за

один цикл, т. е. за время прокатки одного слитка, пропускаемого в данном случае через валки 16 раз. Далее процесс повторяется. Момент двигателя в каждый момент времени не соответствует моменту стана. Разница получается за счет работы маховых масс.

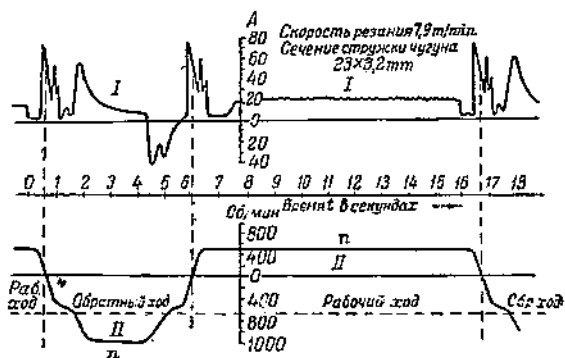
На фиг. 27 показано изменение скорости и тока реверсивного двигателя постоянного тока, вращающего строгальный станок.

Подобные графики носят название *нагрузочных диаграмм*. Из всего огромного разнообразия их мы здесь ограничимся тремя вышеприведенными примерами. Способы теоретического получения нагрузочных диаграмм, характеризующих работу двигателя, будут даны ниже. Здесь же мы поставим себе задачу — определить мощность двигателя в том случае, когда некоторый регулярно по циклам повторяющийся график рабочей машины уже известен.



Фиг. 26. График моментов некоторого неперевёрнутого прокатного стана и приводящего его двигателя.

Выбор мощности двигателя при переменной нагрузке представляет значительно более трудную задачу, чем при постоянной нагрузке. Если бы мы взяли двигатель с мощностью, равной максимальной мощности графика, то мы сделали бы ошибку. Двигатель был бы нормально недогружен. Если бы выбрали двигатель по



Фиг. 27. Изменение скорости и тока реверсивного двигателя постоянного тока, приводящего строгальный станок.

средней мощности, то, как видно будет из последующего, допустили бы также серьезную ошибку. Мощность двигателя была бы мала, и, следовательно, он вышел бы быстро из строя или же срок службы его значительно бы сократился. На средней мощности можно базироваться лишь при очень небольших колебаниях нагрузки, не превышающих нескольких процентов.

Выясним общие основания для выбора мощности двигателя при переменной нагрузке. Поскольку исправность работы двигателя характеризуется его нагревом, то мы должны выбрать двигатель так, чтобы в моменты максимальных температур (при переменной нагрузке температура двигателя будет колебаться) температура отдельных частей машины не превосходила допустимого для изоляции максимума. Построение изменений температуры во времени может быть сделано лишь после выбора электродвигателя, так как только тогда становится известной его постоянная времени нагрева. Поэтому мы должны как-то ориентировочно выбрать мощность (габарит) двигателя и проверить его на нагрев, вычислив температурную кривую.

Принципиально двигатель сразу выбрав быть не может, и к выбору его мощности следовало бы подходить путем последовательного приближения. Однако во многих случаях мощность двигателя можно получить сразу путем некоторых несущественных для практики упрощений.

Процесс выбора мощности двигателя для переменной нагрузки должен по существу заключаться в следующем. На основании предварительных подсчетов или статистических данных мы задаемся двигателем некоторой определенной мощности (габарита) и с определенной постоянной времени нагрева. Имея нагрузочную диаграмму рабочей машины, можно высчитать среднюю мощность P_m и мощность двигателя ориентировочно принять равной

$$P = (1,2 \div 1,3) \cdot P_m.$$

Коэффициент 1,2—1,3 приближенно учитывает превышение мощности двигателя над средней мощностью нагрузки. Лишь в отдельных частных случаях этот коэффициент достигает величины 1,5—1,8. Зная таким образом двигатель и его к. п. д., строим, пользуясь нагрузочной диаграммой механизма, кривую потерь в двигателе. По кривой потерь определяем кривую изменения температуры до тех пор, пока колебания температуры не установятся. Практически это необходимо было бы проделать для весьма большого количества циклов. Если максимальная получающаяся при этом температура оказывается выше допустимой (для примененной в машине изоляции), то мощность двигателя должна быть повышена, и расчет проделан вновь. В обратном случае мощность двигателя должна быть понижена и вновь должно быть проделано построение или расчет и так до полного совпадения получающейся максимальной температуры с максимальной допустимой. Из изложенного видно, насколько большее значение могло бы иметь введение в заводские прейскуранты машин постоянных времени нагрева.

При рассмотренном выше методе мы, очевидно, сталкиваемся с необходимостью: 1) знать то, что мы хотим определить, 2) строить температурный график за большой период. Продолжительность отдельного цикла часто измеряется секундами или десятками се-

кунд, а температура устанавливается через $1\frac{1}{2}$ —3—5 час., а иногда и более. Работа по вычислению температуры получалась бы чрезвычайно длительной и кропотливой. Поэтому, естественно, возникает необходимость прибегать к более простым методам.

Значительное упрощение получается, если мы будем (с очень небольшим допущением) считать потери в железе и на трение неизменными. Исключение составляет лишь серийный двигатель, где эти потери могут меняться значительно. Поскольку потери в железе и на трение неизменны, то они вызовут лишь постоянное превышение температуры частей двигателя над окружающей средой. Колебания же температуры будут вызваны исключительно переменными потерями в меди, пропорциональными квадрату силы тока. Во всех типах двигателей, за исключением серийных и пусковых режимов асинхронных и синхронных, сила тока пропорциональна моменту, так как поток Φ остается постоянным ($M=c \cdot \Phi \cdot I$). В случае двигателей, у которых $n \approx \text{const}$ (щунтовые коллекторные двигатели постоянного и переменного тока, синхронные и асинхронные двигатели) $P=c \cdot n \cdot M \approx M$.

Таким образом почти во всех типах двигателей изменение силы тока при работе можно считать пропорциональным изменению M и P .

Отсюда вытекает следующий простой теоретический способ определения мощности двигателя. Строим нагрузочную диаграмму рабочей машины $P=f(c)$ или $M=\varphi(t)$ (фиг. 28). Возводим ее ординаты в квадрат (кривая P^2). Кривая P^2 дает график, пропорциональный квадрату силы тока, т. е. потерям в меди. Ориентировочно (хотя бы по средней мощности графика с преувеличением на 15—20%) принимаем мощность двигателя и по ней определяем постоянную времени нагрева. Имея постоянную времени нагрева двигателя и зная изменение переменных потерь в нем и его теплоотдачу, можно было бы произвести вычисление кривой изменения температуры до тех пор, пока колебания температуры не установятся.

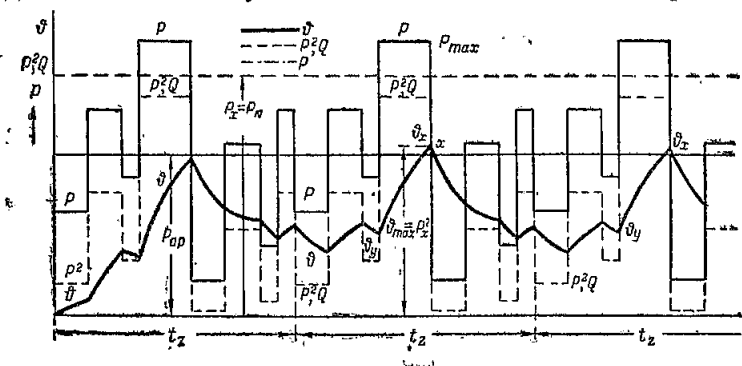
Использование упомянутого выше шаблона для этой цели следует признать практически непригодным по следующим причинам.

1. Так как температура машины достигает установившихся колебаний по истечении большого периода времени, то график температуры имел бы совершенно неприемлемую практически длину. На графике фиг. 28 для упрощения принято, что колебания температуры устанавливаются уже в конце второго цикла, тогда как в действительности это может иметь место иногда после нескольких сот и даже нескольких тысяч циклов.

2. Многократное применение графического метода в форме шаблона дало бы недостаточную точность.

В точке x (фиг. 28) мы будем иметь максимальное превышение температуры машины над окружающей средой ϑ_x . На постоянное превышение температуры ϑ_c , вызванное постоянными по-

терями, наложится превышение ϑ_x , вызванное переменными потерями. Если машина надлежащим образом использована, то $\vartheta_x + \vartheta_c$ должно быть равно максимальному допустимому превышению температуры для примененной изоляции. Такую же температуру двигателя мы получили бы, если бы в нем все время были



Фиг. 28. Определение мощности двигателя на основании графиков нагрева.

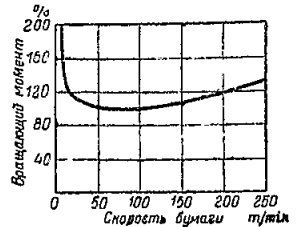
Потери Q_x , т. е. если бы двигатель все время развивал мощность P_x . Следовательно, для данного механизма нужно выбрать двигатель мощностью P_x . С точки зрения нагрева он будет удовлетворителен и вместе с тем будет полностью использован.

Однако выбранный таким образом двигатель должен быть проверен на перегрузку. Эта проверка касается уже не тепловых свойств машины, а электромагнитных—коммутации для коллекторных машин, синхронизирующей силы для синхронных, опрокидывающего момента для асинхронных. Отношение $M_{max}: M_x$ или $P_{max}: P_x$ должно лежать в допустимых пределах. Если отношение $M_{max}: M_x > \lambda_m$, то мощность двигателя, удовлетворительная по нагреву, недостаточна из-за других свойств двигателя. Мощность двигателя должна быть повышена так, чтобы $M_{max}: M_x \leq \lambda_m$. В таких случаях говорят, что двигатель выбирается по перегрузке, а не по нагреву. Особо серьезное внимание на перегрузочный момент нужно обращать в тех установках переменного тока, где возможны сильные колебания напряжения. Это, например, может иметь место при приводе вспомогательных механизмов электрических станций. Двигатели для этих механизмов часто устанавливаются большей мощности, чем необходимо при нормальной работе, так как они должны надежно нести нагрузки в периоды значительного падения напряжения при неисправностях основной сети.

Кроме проверки на перегрузочный момент двигатель должен быть проверен на пусковой момент. Рабочий

Момент двигателя и пусковой в некоторых случаях могут сильно отличаться. Пусковой момент, необходимый от двигателя для разворачивания механизма, иногда бывает значительно больше рабочего. Во-первых, статическое трение механизма, в особенности после долгой остановки, бывает часто значительно больше динамического. Кроме того во время пуска механизма с большими маховыми массами двигатель должен развивать значительный ускоряющий момент. На повышенный момент статического трения и динамический момент часто накладывается рабочий момент машины.

На фиг. 29 показано изменение в зависимости от скорости момента сопротивления бумагоделательной машины. Кривая показывает, что момент статического трения может быть значительно больше момента динамического трения.



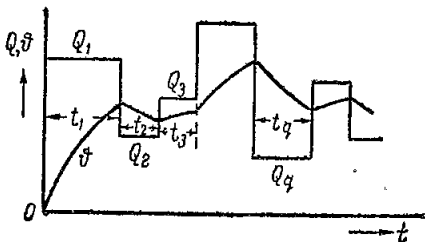
Фиг. 29. Изменение потребного вращающего момента, от скорости для бумагоделательной машины.

Говоря о выборе мощности двигателя для любого режима работы, необходимо отметить еще следующее. Нужно проанализировать и учесть все возможные режимы работы. Так, в небольшой ленточной пиле статический момент трения сильно увеличивается чрезмерным натяжением пилы. Глиномялка, оставленная на большой период времени для закладки глины, требует весьма большого пускового момента.

Особо следует отметить механизмы с регулируемой скоростью. В них нужно рассмотреть обязательно все скоростные режимы. Мощность двигателя должна быть выбрана так, чтобы двигатель справился с возложенной на него работой во всех необходимых случаях.

13. Метод эквивалентного тока и эквивалентного момента

Указанный в предыдущем параграфе метод выбора мощности двигателя для практики оказывается еще весьма громоздким. Он



Фиг. 30. Изменение температуры двигателя в зависимости от потерь в нем.

требует знания постоянной времени нагрева двигателя, которых заводы в своих каталогах обычно не дают, и, что самое существенное, требует весьма длительного вычисления температурной кривой. Поэтому практика прибегает к упрощенному способу, так называемому методу эквивалентного тока.

Пусть у нас имеется нагрузочная диаграмма потерь двигателя $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ за один цикл работы. Этим потерям соответствуют промежутки времени $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ (фиг. 30).

Будем последовательно находить превышения температуры двигателя при его работе. Для переменной нагрузки мы должны выбрать такой двигатель, который при какой-то постоянной нагрузке имел бы такую же максимальную температуру, как максимум температуры при рассматриваемой переменной нагрузке.

При переменной нагрузке превышение температуры двигателя увеличивается, следуя равенствам

$$\vartheta_1 = \frac{Q_1}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\theta}}\right) + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{t_1}{\theta}}, \quad (12)$$

$$\vartheta_2 = \frac{Q_2}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_2}{\theta}}\right) + \vartheta_1 \cdot e^{-\frac{t_2}{\theta}}, \quad (13)$$

$$\vartheta_3 = \frac{Q_3}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\theta}}\right) + \vartheta_2 \cdot e^{-\frac{t_3}{\theta}}, \quad (14)$$

$$\vartheta_n = \frac{Q_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{\theta}}\right) + \vartheta_{n-1} \cdot e^{-\frac{t_n}{\theta}}. \quad (15)$$

Пусть ϑ_n — максимальное превышение температуры двигателя, достигнутое по истечении большого числа циклов. Подставляя в (15) значение ϑ_{n-1} из предыдущего равенства, в которое в свою очередь подставлено значение ϑ_{n-2} , и т. д., получим

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_n = & \frac{Q_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{\theta}}\right) + \\ & + \frac{Q_{n-1}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_{n-1}}{\theta}}\right) \cdot e^{-\frac{t_n}{\theta}} + \dots + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{\sum_1^n t_y}{\theta}}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Если бы нагрузка машины оставалась постоянной и равной нагрузке с потерями в двигателе Q_x , соответствующими максимальному нагреву, допустимому для изоляции, то мы имели бы максимальное превышение температуры

$$\vartheta_x = \frac{Q_x}{A} \left(1 - e^{-\frac{\sum_1^n t_x}{\theta}}\right) + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{\sum_1^n t_y}{\theta}}. \quad (17)$$

В обоих случаях—переменной и постоянной нагрузки—мы должны иметь одно и то же максимальное превышение температуры. Следовательно,

$$\vartheta_n = \vartheta_x.$$

Приравниваем правые члены равенств (16) и (17)

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_n}{A} (1 - e^{-\frac{t_n}{\theta}}) + \frac{Q_{n-1}}{A} (1 - e^{-\frac{t_{n-1}}{\theta}}) \cdot e^{-\frac{t_n}{\theta}} + \dots \\ \dots + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{\sum_1^n t_y}{\theta}} = \frac{Q_x}{A} (1 - e^{-\frac{\sum_1^n t_x}{\theta}}) + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{\sum_1^n t_y}{\theta}} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

После сокращения последних членов левой и правой части равенства (18) разлагаем основание натуральных логарифмов e во всех членах в ряд по равенству

$$e^{-y} = 1 - y + \frac{y^2}{2!} - \frac{y^3}{3!} + \dots$$

Например,

$$\begin{aligned} \frac{Q_x}{A} (1 - e^{-\frac{\sum_1^n t}{\theta}}) &= \frac{Q_x}{A} \left[1 - \left\{ 1 - \sum_1^n \frac{t}{\theta} + \left(\sum_1^n \frac{t}{\theta} \right)^2 \cdot \frac{1}{2!} + \dots \right\} \right] \approx \\ &\approx \frac{Q_x}{A} \cdot \sum_1^n \frac{t}{\theta} = \frac{Q_x}{A} \cdot \frac{1}{\theta} (t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n). \end{aligned}$$

Пренебрегая таким образом в разложении e в ряд всеми высшими степенями разложения, кроме первой, и сокращая все равенство (18) на A и θ , получаем

$$Q_x = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + Q_3 t_3 + \dots + Q_n t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n} \quad (19)$$

Равенство (19) показывает, что выбор двигателя при переменной нагрузке может быть произведен на основании тех соображений, что потери двигателя при длительной неизменной (номинальной) нагрузке должны соответствовать средним потерям при переменном режиме работы.

В условиях работы электроприводов при переменной нагрузке температура достигает максимума по истечении весьма большого количества Ψ циклов, причем этот максимум в общем случае может быть не в конце цикла, а в середине. Поэтому равенство (19) будет иметь вид:

$$Q_x = \frac{(Q_1 \cdot t_1 + Q_2 t_2 + \dots + Q_n t_n) \cdot \Psi + Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \dots + Q_1 t_1}{\Psi \cdot \sum_1^n t_x + (t_1 + t_2 + \dots + t_n)} \quad (19')$$

где Ψ — число полных циклов, после которого достигается макси-

мальная температура, а Q_1 — потери той части ($\Psi + 1$) цикла, после которой температура достигает максимума. Так как при большом числе $\Psi = (Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \dots + Q_n t_n)$ мало по сравнению с $(Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \dots + Q_n t_n) \cdot \Psi$ и соответственно $(t_1 + t_2 + \dots + t_n)$ мало по сравнению с $\Psi \cdot \sum_1^n t_i$, то правыми членами числителя и знаменателя в (19) мы можем пренебречь, откуда и получаем

$$Q_x = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + Q_3 t_3 + \dots + Q_n t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}. \quad (20)$$

Введя в (20) вместо калорий Q потери в ваттах и разделив в (20) потери на постоянные (q_{Nc}) и переменные (q_{xv}), имеем

$$q_{Nc} + q_{xv} = \frac{(q_{Nc} + q_{1v})t_1 + (q_{Nc} + q_{2v})t_2 + \dots + (q_{Nc} + q_{nv})t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (21)$$

Но переменные потерь

$$q_{xv} = c \cdot I_x^2 \cdot R, \quad (22)$$

где R — сопротивление якоря или статора или ротора, а c — постоянная, зависящая от числа фаз. Подставляя значения, выраженные согласно (22) в (21), исключая q_{Nc} и сокращая на R , получаем

$$I_x^2 = \frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}. \quad (23)$$

Ток I_x носит название эквивалентного тока I_s .

$$I_x = I_s = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (24)$$

Равенство (24) отнесено к одному циклу.

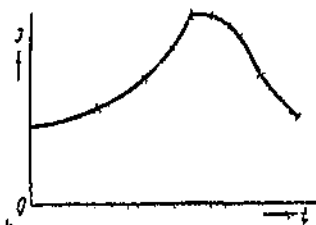
Таким образом при некотором упрощении, практически в большинстве случаев допустимом, мы получаем, что двигатель с длительным током, равным эквивалентному I_s , будет с точки зрения нагрева удовлетворять тому переменному режиму работы, который мы рассматриваем. Метод эквивалентного тока является простым и чуть ли не единственным, применяемым на практике, для переменного режима работы, так как неточности, им обуславливаемые, в большинстве случаев несущественны, а упрощение для практических целей получается исключительно важное. Неточности метода заключаются, прежде всего, в допущении постоянства величины потерь в железе и на трение на всем режиме работы.

После определения I_s двигатель должен быть проверен на перегрузку, т. е. отношение $I_{max} : I_s \leq \lambda_I$.

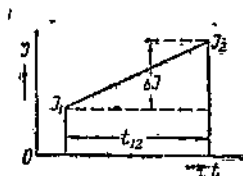
Так как номинальный ток I_N выбираемого двигателя обычно не равен I_s , а несколько больше последнего, то проверка на перегрузку вообще должна производиться по I_N , а не по I_s .

В том случае, когда график I представляет собой кривую, то для нахождения эквивалентного тока в некоторых случаях она может быть заменена отрезками прямых (фиг. 81).

Если кривая I состоит из отрезков прямых, не параллельных оси абсцисс, то нахождение эквивалентного тока может быть сделано следующим образом. Пусть мы имеем прямолинейный график



Фиг. 81. Замена кривой отрезками прямых.



Фиг. 32. Нахождение I_s для прямолинейного изменения I .

изменения тока, представленный на фиг. 32. В нем I_1 — начальное значение тока, I_2 — его конечное значение, t_{12} — продолжительность периода изменения тока от I_1 до I_2 . Найдём значение I_s за промежуток t_{12}

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{t_{12}} \int_0^{t_{12}} I^2 dt}. \quad (25)$$

Законом изменения тока будет прямая

$$I = I_1 + at, \quad (26)$$

где

$$a = \frac{I_2 - I_1}{t_{12}} = \frac{\Delta I}{t_{12}}. \quad (27)$$

Подставляя (26) в (25), имеем

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{t_{12}} \int_0^{t_{12}} (I_1 + at)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{t_{12}} \int_0^{t_{12}} (I_1^2 + 2aI_1t + a^2t^2) dt}. \quad (28)$$

Интегрируя (28), находим

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{t_{12}} \left(I_1^2 t_{12} + a I_1 t_{12}^2 + \frac{a^2 t_{12}^3}{3} \right)}. \quad (29)$$

Так как согласно (27)

$$a I_1 \cdot t_{12}^2 = I_1 \cdot \Delta I t_{12} \quad \text{и} \quad \frac{a^2 \cdot t_{12}^3}{3} = \frac{(\Delta I)^2 \cdot t_{12}}{3},$$

то

$$I_s = \sqrt{I_1^2 + I_1 \cdot \Delta I + \frac{(\Delta I)^2}{3}} = \sqrt{I_1(I_1 + \Delta I) + \frac{(\Delta I)^2}{3}} = \sqrt{I_1 I_2 + \frac{(\Delta I)^2}{3}} \quad (30)$$

В том случае, когда $\Delta I \leq 0,25 I_1$, величиной $\frac{(\Delta I)^2}{3}$ можно пренебречь. При этом ошибка получится меньше 1%. В самом деле, при ошибке в 1%

$$\sqrt{I_1 \cdot I_2 + \frac{(\Delta I)^2}{3}} = 1,01 \cdot \sqrt{I_1 I_2}.$$

Следовательно,

$$I_1 \cdot I_2 + \frac{(\Delta I)^2}{3} = 1,02 \cdot I_1 \cdot I_2,$$

откуда

$$\frac{(\Delta I)^2}{3} = 0,02 \cdot I_1 \cdot I_2 \text{ и } \Delta I = \sqrt{0,06 \cdot I_1 \cdot I_2}$$

или

$$\Delta I = 0,245 \cdot \sqrt{I_1 I_2}.$$

Так как

$$I_1 < \sqrt{I_1 I_2},$$

то при

$$\Delta I \leq 0,245 I_1$$

ошибка будет меньше 1%.

В общем случае прямолинейного изменения тока на n участках

$$I_s = \sqrt{\frac{I_1 \cdot I_2 \cdot t_{12} + I_2 \cdot I_3 \cdot t_{23} + \dots + I_{n-1} \cdot I_n \cdot t_{n(n-1)} + \frac{1}{3} (\Delta I_{12})^2 t_{12} + \dots + \frac{1}{3} (\Delta I_{n(n-1)})^2 t_{n(n-1)}}{t_{12} + t_{23} + \dots + t_{n(n-1)}}} \quad (31)$$

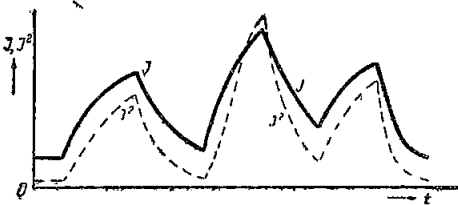
Для прямолинейного изменения тока на участке t_{12} (фиг. 32) также часто пользуются формулой

$$I_s = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2}{3}} \quad (32)$$

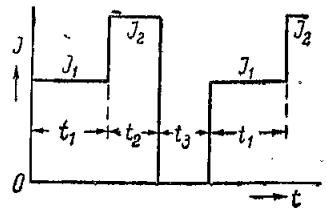
Определение средней квадратичной (эквивалентной) величины графика может быть выполнено весьма просто посредством специального инструмента—интегратора Амслера. Проводя карандашом или острием этого инструмента по исследуемой кривой, сразу получаем на нем значение средней квадратичной. Пользование им такое же, как и обычным планиметром.

При отсутствии интегратора Амслера для нахождения средней квадратичной можно воспользоваться обыкновенным интегратором. С этой целью кривую $I=f(t)$ возводят в квадрат и получают кривую $I^2=\varphi(t)$ (фиг. 33). Планиметрируя площадь, ограниченную этой кривой, получают интеграл $\int_0^{t_R} I^2 dt$. Деля с учетом масштабов полученную площадь на t и извлекая квадратный корень, находят I_s .

Указанные методы определения эквивалентного тока с успехом применяются в проектных организациях и заводах. При массовых испытаниях двигателей на промпредприятиях в целях проверки соответствия потребной и установленной мощности и выяв-



Фиг. 33. Кривая силы тока I и квадратичная кривая I^2 .



Фиг. 34. График изменения тока некоторого электропривода.

ления чрезмерных мощностей установленных двигателей эти методы оказываются сложными в отношении затраты времени на вычисления. В качестве упрощенных способов в этом случае может быть рекомендовано применение: 1) счетчиков, дающих непосредственно величину $\int_0^{t_R} I^2 dt$. Эти счетчики дают некоторую не-

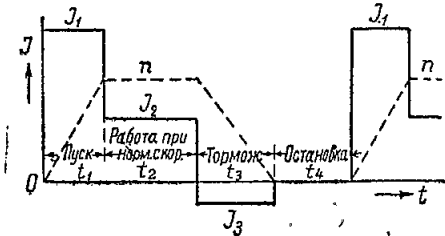
точность при резко пиковой нагрузке; 2) использование регистрирующих ферродинамических и индукционных приборов с квадратичной шкалой [Л. 38, 39]. Планиметрируя записанную этими приборами кривую нормальным планиметром, мы опять-таки получаем площадь $S = \int_0^{t_R} I^2 dt$. Неточность этого метода получается порядка 3—5%.

При пользовании методом эквивалентного тока необходимо учесть следующее. В случае вычисления эквивалентного тока по равенству (24) нужно учитывать не только периоды работы двигателя, но также и периоды остановок, входящих в рассматриваемый цикл. Так для графика фиг. 34

$$I_s = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad (33)$$

Выражение (24) остается в силе, но только в нем $I_3^2 t_3 = 0$, так как $I_3 = 0$. Вхождение в знаменатель (33) паузы учитывает охлаждение двигателя в этот период.

Однако метод эквивалентного тока имеет в своей основе условия нагревания и охлаждения электродвигателя. Эти условия зависят от скорости двигателя, так как в покое и при пониженной скорости, т. е. при пуске и остановке, постоянная времени нагрева имеет другое значение, чем при нормальной работе. Поэтому, если в рассматриваемый цикл работы входит остановка и пуск двигателя



Фиг. 35. График изменения тока и скорости двигателя подъемника.

замедления $\alpha = 0,75$ действительного времени, а для периода остановки $\beta = 0,5$. Для асинхронных двигателей $\alpha = 0,5$ и $\beta = 0,25$. Например, в графике (фиг. 35) при двигателе постоянного тока

$$I_s = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3}{0,75 t_1 + t_2 + 0,75 t_3 + 0,5 t_4}} \quad (34)$$

Достаточно точные значения коэффициентов α и β для разных двигателей союзного производства не установлены. Инж. Барским [Л. 40] теоретически и экспериментально обоснованы значения соответствующих коэффициентов для асинхронных двигателей, приводящих различные шахтные подъемники. Обоснование ввода коэффициентов ухудшения охлаждения дано также в книге Н. П. Куницкого «Электрооборудование подъемно-транспортных сооружений», ч. II, стр. 49.

Существенно еще раз подчеркнуть, что мощность двигателя определяется средней квадратичной или эквивалентной силой тока, а не средней. Средняя квадратичная сила тока $I_s > I_m$, так как

$$I_s = \sqrt{\frac{\int_0^{t_k} I^2 dt}{t_k}} > I_m = \frac{\int_0^{t_k} I dt}{t_k}$$

При практическом решении задачи о выборе мощности двигателя нам чаще приходится оперировать не с токами, а с вращающимися моментами. Сила тока двигателя при данной мощности за-

висит от рода тока и от величины напряжения. Подсчитывая нагрузку двигателя для какой-либо рабочей машины, мы получаем график моментов. В таком случае удобнее метод эквивалентного тока заменить методом эквивалентного момента.

Во всех электродвигателях

$$M = c \cdot I \cdot \Phi.$$

В двигателях шунтовых постоянного тока, асинхронных при нормальной работе, шунтовых коллекторных переменного тока и синхронных (т. е. практически во всех типах двигателей, кроме серийных) $\Phi = \text{const}$. В таком случае $M = c' \cdot I$. Метод эквивалентного тока превращается в метод эквивалентного момента. Задача определения мощности двигателя заключается при этом в следующем. Определяем для электродвигателя график $M = f(t)$.

Находим M_g :

$$M_g = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}} \quad (35)$$

Проверяем двигатель на перегрузку.

Отношение $\frac{M_{max}}{M_g} \leq \lambda_n$. Точно так же пусковой момент M_{pp} должен быть меньше $M_g \cdot \lambda$.

Если M_g не удовлетворяет условиям пуска или перегрузки, то M_g должен быть повышен. Мощность двигателя

$$P_N \cong P_g = M_g \cdot \omega_N,$$

ибо двигатель должен развивать эквивалентный момент при номинальной скорости. На этом расчет мощности двигателя заканчивается.

В серийных двигателях постоянного тока поток меняется $M \neq c \cdot I$. Поэтому к серийным двигателям метод эквивалентного момента неприменим. В них нужно пользоваться методом эквивалентного тока.

В случае компаундных двигателей постоянного тока считать Φ постоянным также нельзя. В них также $M \neq c \cdot I$. Следовательно, для перехода от метода эквивалентного тока к методу эквивалентного момента в компаундных двигателях необходимо внесение поправок. Во всех случаях $M = c \cdot I \cdot \Phi$. При данном моменте нагрузки M и изменившемся Φ'

$$\frac{I'}{I} = \frac{\Phi}{\Phi'}.$$

Отсюда следует, что при большем магнитном потоке ток в якоре двигателя будет меньше, чем он был бы в шунтовом двигателе при постоянном потоке. Поэтому для использования кривой моментов с целью определения мощности компаундного двигателя нужно в нее внести поправку, чтобы кривая момента соответство-

вала кривой изменения тока. Кривая M' (момента с поправкой) получится из выражения

$$\frac{M'}{M} = \frac{I'}{I} = \frac{\Phi}{\Phi'}$$

где Φ — поток холостого хода компаундного двигателя,

На фиг. 36 показана кривая момента рабочей машины M_k , кривая момента двигателя M_d без поправки и кривая M'_d — с поправкой. Соотношение $\frac{\Phi}{\Phi'}$ может быть найдено лишь из характеристики двигателя.

В данном случае принята специальная компаундная характеристика с падением скорости от холостого хода до M_N в 5%, от M_N до $2 M_N$ — в 10%.

Тогда

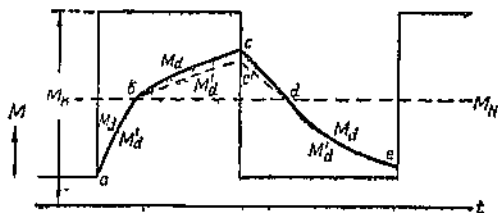
$$M'_p = \sqrt{\frac{\sum M_x^2 \cdot t_x}{\sum t_x}}$$

и

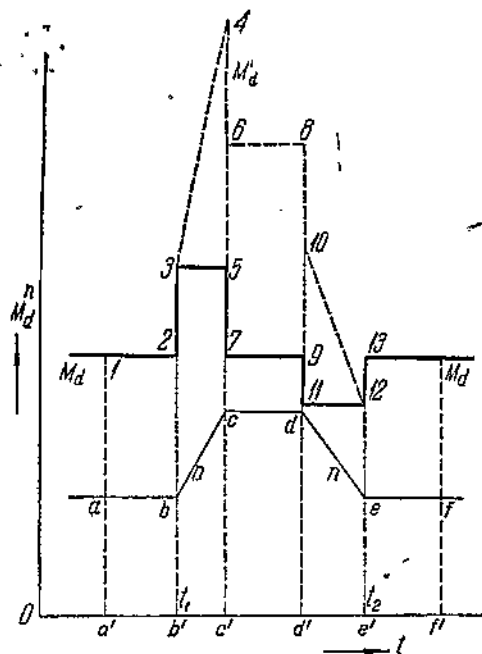
$$P_s = M'_p \cdot \omega_N$$

Невнесение поправки в кривую моментов двигателя повело бы к некоторому увеличению его мощности.

Аналогичную поправку при применении метода эквивалентного момента приходится вносить в шунтовых двигателях постоянного тока с регулированием скорости током возбуждения. Положим, что шунтовой двигатель должен развивать момент M_d , представленный на фиг. 37. При этом от времени t_1 до времени t_2 двигатель работает с повышенной скоростью за счет уменьшения тока возбуждения, т. е. при уменьшенном магнитном потоке.



Фиг. 36. Поправка для нахождения эквивалентного момента в компаундном двигателе.



Фиг. 37. Внесение поправки в случае шунтового двигателя с регулированием скорости током возбуждения.

На участках при полном потоке Φ от a до b и от l до f пропорциональность между моментом и током сохраняется. Кривая вращающего момента в соответствующем масштабе является в то же самое время и кривой тока. На участках $b-c-d-e$ пропорциональность между M и I нарушается. На этих участках кривая тока лежит выше кривой момента M в таком отношении, в каком уменьшился магнитный поток. Для шунтовых двигателей

$$n = \frac{E}{c\Phi}.$$

Принимая с небольшой погрешностью $E \approx \text{const}$, мы можем написать, что

$$\frac{n'}{n} = \frac{\Phi}{\Phi'}.$$

При заданной величине вращающего момента

$$M = c \cdot I \cdot \Phi = c \cdot I' \Phi',$$

$$\frac{I'}{I} = \frac{\Phi}{\Phi'} = \frac{n'}{n}.$$

На тех участках, где кривая I разнится от кривой момента M , она показана пунктиром. Вычисление отдельных точек этой кривой ведется по равенствам

$$\frac{c'6}{c'7} = \frac{d'8}{d'9} = \frac{n'}{n} = \frac{cc'}{bb'} = \frac{I'}{I} = \frac{\Phi}{\Phi'};$$

$$\frac{c'4}{c'5} = \frac{n'}{n} = \frac{cc'}{bb'}; \quad \frac{d'10}{d'11} = \frac{n'}{n} = \frac{cc'}{bb'}.$$

В точке b поток имеет максимальное значение. Изменение тока от точки 3 до точки 4 идет по прямой линии.

В точке e поток снова имеет максимальное значение. Изменение тока от точки 10 до точки 12 идет по прямой. В случае использования метода эквивалентного тока подсчет I_s ведется по кривой I' . В случае применения метода эквивалентного момента также используется кривая I' , именуемая в таком случае кривой моментов (M') с поправкой

$$M_s = \sqrt{\frac{\sum M_x'^2 \cdot t_x}{\sum t_x}}.$$

Проверку двигателя на перегрузку для подобных условий нужно производить по току для максимальной скорости.

Особое положение в отношении метода эквивалентного момента занимают также пусковые и некоторые тормозные режимы короткозамкнутых асинхронных двигателей. В рабочем режиме от скольжения $s=0$ до номинального скольжения и даже несколько большего момент двигателя остается практически пропорциональ-

ным току. Следовательно, для указанного режима можно было бы применять метод эквивалентного момента. На всех остальных частях характеристики и в пусковых и тормозных режимах пропорциональности между током и моментом не существует. Поэтому для короткозамкнутых двигателей (кроме указанных выше пределов) метод эквивалентного момента неприменим. Здесь необходимо пользоваться методом эквивалентного тока. Вопросы взаимного теплового влияния статора и ротора будут рассмотрены далее.

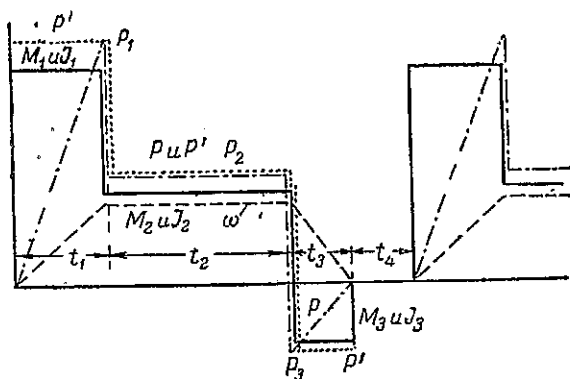
Иногда вместо метода эквивалентного момента пользуются методом эквивалентной мощности. Определяют диаграмму мощности теоретически (расчетом) или экспериментально. Тогда

$$P_s = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (36)$$

После этого остается проверить двигатель на перегрузку в рабочем режиме и пусковые условия, т. е. убедиться в том, что

$$P_{\max} : P_s \leq \alpha_p.$$

Метод эквивалентной мощности предполагает постоянство к. п. д., а для двигателей переменного тока кроме того постоянство $\cos \varphi$.



Фиг. 38. Графическое сравнение методов $M_{экв}$ и $P_{экв}$.

Однако методом эквивалентной мощности без поправки пользоваться можно лишь в том случае, если скорость двигателя остается постоянной (шунтовой, асинхронный, синхронный двигатели) и если в рассматриваемый период не входят пусковые режимы.

Рассмотрим график подъемника (детальное его построение дано далее). На фиг. 38 даны графики моментов двигателя и нагрузки M , скорости ω , тока I , мощности рабочей машины P и мощности P' , потребляемой двигателем. Согласно методу эквива-

лентного тока или аналогичного ему метода эквивалентного момента получаем

$$M_g = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}, \quad (37)$$

$$P_g = M_g \omega_N.$$

Если бы мы воспользовались графиком мощности рабочей машины $P=f(t)$, то согласно (32) мы бы получили

$$P_g = \sqrt{\frac{\frac{P_1^2 t_1}{3} + P_2^2 t_2 + \frac{P_3^2 t_3}{3}}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}. \quad (38)$$

Однако полученная таким образом мощность двигателя будет значительно меньше необходимой. Потребная мощность двигателя будет равна

$$P_g = \sqrt{\frac{P_1^3 t_1 + P_2^3 t_2 + P_3^3 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}. \quad (39)$$

Объясняется это расхождение не неточностью формулы (32), а тем, что характер изменения мощности рабочей машины в данном случае не отражает собой условий нагрева двигателя, т. е. характера изменения в нем тока за рассматриваемый период. В периоды пуска или остановки мощность двигателя также меняется, но не за счет изменения тока, который во время ускорения и замедления остается примерно постоянным, а за счет изменения скорости. Во все время пуска, а в некоторых схемах и при торможении, например, когда двигатель работает генератором, ток двигателя остается постоянным. Разность площадей, ограничиваемых кривыми P и P' с осью абсцисс, представляет потери в пусковом реостате. Следовательно, для надлежащего учета условий нагрева двигателя в данном случае нужно применять формулу (39), а не (38), с учетом поправки согласно (34), учитывающей то, что изменение скорости отзывается на худшем охлаждении двигателя. Таким образом метод эквивалентной мощности при сильных колебаниях скорости нужно применять с большой осторожностью, внося соответствующие поправки. В тех случаях, когда в метод эквивалентного момента вносятся поправки, они должны вноситься и в метод эквивалентной мощности.

Необходимо отметить, что все неточности, допускаемые в методе эквивалентного тока, в полной мере находят свое отражение и в производных от него методах—эквивалентного момента и мощности (в пределах их применимости).

Коснемся кратко неточностей метода эквивалентного тока. Метод эквивалентного тока пренебрегает изменением постоянных потерь, полагая, что переменные потери изменяются пропорционально квадрату тока. Это дает обычно приемлемые практически результаты для двигателей шунтовых постоянного тока, синхрон-

ных и частично асинхронных, но обуславливает значительные ошибки для двигателей серийных и для асинхронных двигателей низкого cosφ. В общем в отношении метода эквивалентного тока для серийных двигателей и асинхронных низкого cosφ на основании подсчетов можно отметить следующее:

1. Если характер нагрузки таков, что двигатель большую часть времени недогружен, то метод эквивалентного тока дает меньшие величины, чем то соответствует нагреву двигателя.

2. Наоборот, если двигатель работает при больших нагрузках и перегрузках, чередующихся с холостым ходом, но без частичных нагрузок, то метод эквивалентного тока дает большие величины.

3. Если в цикл работы входят большие нагрузки, перегрузки, холостой ход, частичная нагрузка, то метод эквивалентного тока может давать большие или меньшие величины в зависимости от того, преобладает ли частичная нагрузка или холостой ход.

14. Метод выбора мощности двигателя для переменного режима работы по средним потерям

Некоторая неточность метода эквивалентного тока повела к тому, что в ряде наиболее ответственных случаев в последнее время стали применять метод проверки выбранной ориентировочно мощности (габарита) двигателя по средним потерям. В отличие от метода эквивалентного тока здесь учитываются не только потери в меди от главного тока, но также и изменение постоянных потерь.

В этом случае, выбрав предварительно на основании тех или иных данных мощность двигателя, строят кривую потерь в нем для всего цикла

$$q_x = q_c + q_p = f(t).$$

Для построения этой кривой, очевидно, нужно знать точные величины потерь в двигателе при разных условиях работы. Принятие ориентировочного соотношения между постоянными и переменными потерями может повести не к улучшению, а к ухудшению результатов по сравнению с методом эквивалентного тока. Имея кривые потерь, можно для всего цикла работы приводимого исполнительного механизма определить среднее значение потерь двигателя.

Если в цикл работы с общей продолжительностью t_p входит пуск длительностью t_p , работа при переменной нагрузке длительностью t_1 , торможение длительностью t_2 и остановка длительностью t_0 , то потерянная в двигателе за цикл энергия будет равна

$$A = \sum_0^{t_p} q_x \cdot \Delta t_x + \sum_{t_p}^{t_p+t_1} q_x \cdot \Delta t_x + \sum_{t_p+t_1+t_2}^{t_p+t_1+t_2+t_0} q_x \Delta t_x. \quad (40)$$

Средние потери в двигателе за цикл будут

$$q_m = \frac{\sum_0^{t_p} q_x \cdot \Delta t_x + \sum_{t_p}^{t_p+t_1} q_x \cdot \Delta t_x + \sum_{t_p+t_1+t_1}^{t_p+t_1+t_1+t_1} q_x \cdot \Delta t_x}{\alpha(t_p+t_1) + t_1 + \beta t_0} \quad (41)$$

Коэффициенты α и β учитывают ухудшение условий охлаждения двигателя в периоды уменьшенной скорости — при разгоне, торможении и в покое. Значения их были приведены выше.

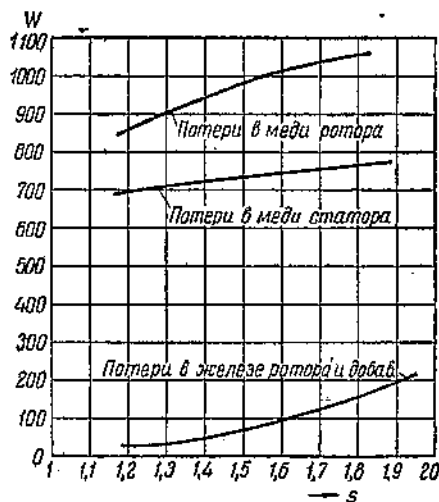
Полученное значение средних потерь двигателя за цикл q_m должно быть равно номинальным потерям в выбираемом двигателе, т. е. потерям при номинальной нагрузке q_N

$$q_m = q_N$$

Если $q_m < q_N$ или если $q_m > q_N$, то должен быть взят следующий габарит двигателя и расчет должен быть проделан вновь до примерного совпадения этих величин. Отклонения, даваемые методом эквивалентных потерь от метода эквивалентного тока, зависят от характера нагрузки двигателя [Л. 39]. Принципиально среднеквадратичный ток должен определяться отдельно для каждой обмотки двигателя с учетом термического влияния других.

Особо важное значение метод эквивалентных потерь имеет для короткозамкнутых двигателей, работающих при частых пусках. Здесь в силу малого междужелезного пространства сильно сказывается влияние потерь ротора на температуру статора. Применение метода эквивалентного тока с использованием одного статорного тока может повести иногда к существенным ошибкам.

Условие учета особенно усложняется, когда для целей торможения короткозамкнутого двигателя используется режим электромагнитного тормоза (противовключения). При этом происходит значительное увеличение медных потерь в роторе за счет увеличения активного сопротивления обмотки ротора при возрастании частоты тока. Одновременно происходит и увеличение железных потерь в роторе. Характер изменения отдельных потерь при скольжении $s > 1$ показан на фиг. 39.



Фиг. 39. Характер изменения отдельных потерь короткозамкнутого двигателя при скольжении $s > 1$.

Кривые показывают, что потери в роторе в режиме электромагнитного тормоза растут быстрее потерь статора. Следовательно, для тормозного режима медные потери в роторе не могут определяться по медным потерям в статоре. Пропорциональность между ними отсутствует. В силу этих условий метод эквивалентного тока с использованием тока статора оказывается неприменимым. Поэтому для короткозамкнутого асинхронного двигателя, работающего в переходных режимах, совершенно обязательным является применение метода средних потерь. Средние потери q_m должны быть вычислены из учета статорных и роторных потерь как в пусковом и тормозном режиме, так и при установившейся скорости

$$q_m = \frac{\Sigma(q_{x^2})_{пуск. ст.} + \Sigma(q_{x^2})_{пуск. рот.} + \Sigma(q_{x^2})_{уст. ст. и рот.} + \Sigma(q_{x^2})_{торм. ст.} + \Sigma(q_{x^2})_{торм. рот.}}{t_z}, \quad (42)$$

где t_z — длительность цикла.

Очевидно, что потери q'_m должны быть равны потерям в двигателе (включая статор и ротор) при номинальной нагрузке

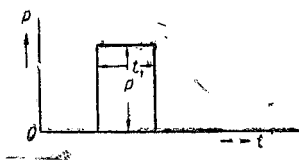
$$q'_m = q_{Nsr}$$

Если известны коэффициенты, характеризующие ухудшение условий охлаждения двигателя при пониженных скоростях и остановке, то вместо t_z можно подставить выражение

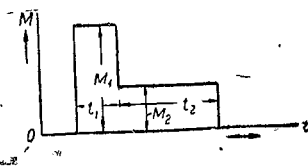
$$t'_z = \alpha(t_p + t_t) + t_v + \beta t_0.$$

15. Выбор мощности двигателя для кратковременной нагрузки

Определение кратковременного режима работы было дано выше в п. 10. Идеальный график кратковременной нагрузки представлен на фиг. 40. В графике фиг. 40 кратковременная мощность



Фиг. 40. Идеальный график кратковременной нагрузки.



Фиг. 41. Практический график кратковременной нагрузки.

рабочей машины остается постоянной, равной P . Соответственно этой мощности должен быть взят двигатель кратковременной мощности P на период работы t_1 .

Практически в период кратковременной работы всегда входит пуск двигателя и остановка, а потому график имеет примерно вид фиг. 41. Возможны и другие виды графика. Здесь к циклу кратко-

временной нагрузки уже необходимо применять метод эквивалентного тока или эквивалентного момента. Так в фиг. 41

$$M_0 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2}{t_1 + t_2}}.$$

В приведенной формуле фигурирует лишь действительное время работы двигателя ($t_1 + t_2$). Выбрав двигатель по нагреву, необходимо проверить на перегрузку, допускаемую по электрическим и механическим свойствам машины.

Определим зависимость между длительной и кратковременной мощностью электродвигателя, исходя из уравнений нагрева машины с принимаемыми в нем допущениями.

В обоих случаях—продолжительной и кратковременной работы—двигателем достигается одна и та же температура, только в первом случае через бесконечно долгое время (∞), а во втором—через определенное (t_n). Таким образом

$$\vartheta_{\max} = \frac{Q_{\infty}}{A} \left(1 - e^{-\frac{\infty}{\theta}}\right) = \frac{Q_{\infty}}{A}. \quad (43)$$

Вместе с тем

$$\vartheta_{\max} = \frac{Q_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{\theta}}\right) = \frac{Q_{\infty}}{A}, \quad (44)$$

откуда

$$\frac{Q_n}{Q_{\infty}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_n}{\theta}}}, \quad (45)$$

$$Q_n - Q_n e^{-\frac{t_n}{\theta}} = Q_{\infty}; \quad Q_n - Q_{\infty} = Q_n \cdot e^{-\frac{t_n}{\theta}}$$

или

$$\frac{Q_n}{Q_n - Q_{\infty}} = e^{\frac{t_n}{\theta}}.$$

Логарифмируя при основании e , получаем

$$\ln \frac{Q_n}{Q_n - Q_{\infty}} = \frac{t_n}{\theta},$$

откуда продолжительность кратковременной работы при потерях Q_n

$$t_n = \theta \cdot \ln \frac{Q_n}{Q_n - Q_{\infty}}. \quad (46)$$

Пользуясь (46) и зная длительную и некоторую кратковременную мощность машины, можно найти постоянную времени нагрева.

Обозначая перегрузочную способность двигателя в тепловом отношении $\frac{Q_n}{Q_\infty}$ через α , получаем

$$\frac{t_n}{\theta} = \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}. \quad (47)$$

Эта зависимость представлена на фиг. 42.

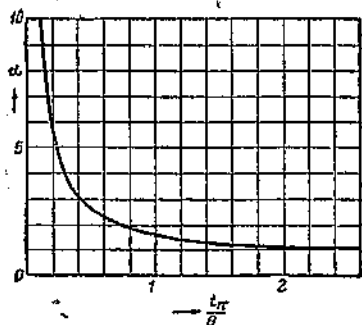
Таким образом, задаваясь α и зная θ (здесь опять необходимо знание постоянной времени нагрева θ), можно узнать допустимую продолжительность кратковременной работы t_n . Заметим, что уравнение (47) указывает, понятно, лишь ориентировочный характер изменения t_n .

В отдельных типах машин (закрытые, вентилируемые двигатели и т. д.) мы имеем некоторые и притом различные отклонения, поскольку условия теплоотдачи двигателя усложняются и неоднородность машины, как одного тела, играет большую роль. Из равенства (47) видно, что отношение кратковременной мощности какой-либо машины к длительной тем меньше, чем больше постоянная времени нагрева.

Таким образом в двигателях больших размеров и двигателях закрытого типа отношение допустимой для данной θ кратковременной мощности к длительной больше, чем в машинах меньшей мощности и открытого типа.

Предельная допустимая для машины кратковременная мощность ограничивается допустимыми условиями механической и электрической перегрузки. Согласно нормам перегрузочный момент двигателя не может быть ниже 1,6. Эти условия и определяют максимальную возможную кратковременную мощность.

Рациональное экономичное использование электрооборудования требует прежде всего максимального использования двигателя при работе в тепловом отношении. С этой точки зрения температура изоляции всех обмоток двигателя должна при работе достигать предельных допустимых значений. Однако, как уже отмечалось выше, не все обмотки двигателя, предназначенного для длительной работы, имеют одинаковые постоянные времени нагрева. Так, в нормальных серийных двигателях постоянного тока малой и средней мощности обмотка возбуждения и коллектор имеют меньшие постоянные θ , следовательно, достигают установившихся температур раньше, чем обмотка якоря. Если мы такую машину применим



Фиг. 42. Допустимое повышение мощности машины для кратковременной нагрузки.

для кратковременной работы, то обмотка возбуждения и коллектор в допустимое для них время будут в тепловом отношении использованы полностью, якорь же нет. При данной конструкции якорь может допустить большую длительность кратковременной работы. Однако ток, поглощаемый якорем двигателя, кратковременно, в течение рассматриваемого промежутка времени повышен быть не может, так как доведение якоря до полного использования в тепловом отношении (в рассматриваемый период) повело бы к перегреву коллектора и обмотки возбуждения. Таковы особенности работы двигателей постоянного тока при кратковременном режиме.

Обратимся теперь к асинхронным двигателям. Как уже указано выше, эти двигатели, будучи предназначены для длительной работы, имеют мгновенную перегрузку 2—2,5. Переходя на кратковременную работу, мы повышаем нагрузку двигателя, т. е. уменьшаем его перегрузочную способность по отношению к отбираемой мощности. Так, заставляя двигатель работать при двойной мощности, по сравнению с длительной, мы получаем перегрузку максимум в $\frac{2,5}{2} = 1,25$ раза, что согласно нормам было бы недостаточно.

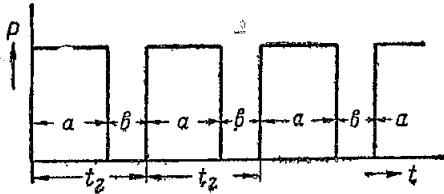
Необходимо повысить перегрузочную способность такого двигателя соответствующим изменением его габаритов и некоторых параметров.

Указанные обстоятельства приводят к заключению о необходимости для кратковременного режима проектировать особую серию двигателей, учитывающую указанные выше факторы.

Требования к двигателям кратковременной мощности в современной практике вообще не очень разнообразны и многочисленны. Поэтому иногда для этого типа машин используют те же модели, что и для двигателей длительного режима работы, соответствующим образом пересчитывая обмотки. Некоторые дополнительные соображения о двигателях кратковременной мощности будут приведены еще в следующем параграфе. Здесь заметим лишь, что мощность двигателя для кратковременной работы должна выбираться по специальным каталогам двигателей для кратковременной работы. Обычно двигатели для кратковременной мощности по условиям их применения конструируются закрытыми. ХЭМЗ им. Сталина выпускает машины кратковременной мощности типа МП для длительности в 30 и 60 мин. Практически иногда требуются длительности кратковременной мощности в 15, 45 и 90 мин. Грубый ориентировочный переход от мощности одной длительности к другой может быть сделан по формуле (47) или по кривой фиг. 42. Точные данные могут быть даны лишь электромашиностроительным заводом. Двигатели, предназначенные для кратковременного режима работы, должны иметь на щитке наряду с мощностью указание о длительности работы (например, $P=20$ kW, 30 мин.).

16. Особенности работы двигателей при повторно-кратковременной нагрузке

Чисто идеальный график повторно-кратковременного режима с одинаковыми длительностями периода t_2 , одинаковыми рабочими периодами a и одинаковыми паузами b представлен на фиг. 43. В нем $t_2 = a + b$.



Отношение $\frac{a}{t_2}$ носит название относительной продолжительности включения. Мы будем обозначать это отношение через ζ

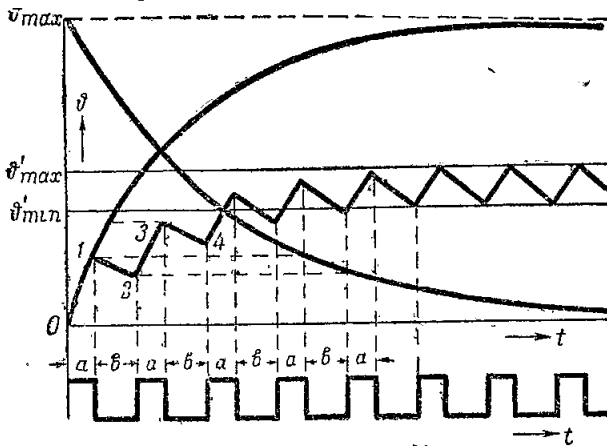
Фиг. 43. График повторно-кратковременного режима работы.

$$\zeta = \frac{a}{t_2} = \frac{a}{a+b} \quad (48)$$

Обычно продолжительность включения выражают в %

$$\zeta \% = \frac{a}{t_2} \cdot 100\% = \frac{a}{a+b} \cdot 100\% \quad (49)$$

В отдельных проектных организациях вместо ζ применяют обозначение ED (сокращение от немецкого слова Einschaltdauer — продолжительность работы или по-русски ПР).



Фиг. 44. Изменение температуры двигателя при повторно-кратковременном режиме работы.

При нормировании двигателей для повторно-кратковременного режима работы нормами ВЭС принята нормальная продолжительность цикла в 10 мин. Таким образом каталожные данные о двигателях повторно-кратковременного режима рассчитаны на шесть циклов в час.

Изменение температуры двигателя для идеального повторно-кратковременного режима представлено на фиг. 44. В этом случае

температура обмоток двигателя изменяется по отрезкам экспоненциальных кривых и, постепенно повышаясь, достигает установившихся колебаний со сравнительно малыми амплитудами.

Так как в рассматриваемом случае нам приходится иметь дело как с процессом нагревания машины при ее вращении, так и с процессом охлаждения в покое, то введем понятие приведенной продолжительности включения ζ' , под которой будем понимать отношение

$$\zeta' = \frac{a}{a + b \cdot \frac{\theta}{\theta_0}}, \quad (50)$$

где θ — постоянная времени нагрева при работе машины, а θ_0 — в покое. Отношение $\frac{\theta_0}{\theta}$ для вычислений ζ' можно принимать в пределах 1,2—1,4. Зная a , b , θ , θ_0 , можно определить теоретически ориентировочное отношение допустимой с точки зрения нагрева мощности двигателя при повторно-кратковременной работе к продолжительной мощности.

Найдем связь между мощностью двигателя при длительной и повторно-кратковременной работе, пользуясь кривыми нагрева.

Так как

$$\vartheta = \vartheta_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right) + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\theta}},$$

то

$$\frac{t}{\theta} = \ln \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta_0}{\vartheta_{\max} - \vartheta}.$$

Взяв период работы a для повторно-кратковременной нагрузки после установившихся уже колебаний температуры в пределах ϑ'_{\min} и ϑ'_{\max} , получаем

$$a = \theta \ln \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta'_{\min}}{\vartheta_{\max} - \vartheta'_{\max}}. \quad (51)$$

Обозначения согласно фиг. 44.

Соответственно для периода охлаждения при установившихся колебаниях имеем из кривой охлаждения

$$t = \theta_0 \ln \frac{\vartheta_{\max}}{\vartheta}.$$

Следовательно,

$$b = \theta_0 \ln \frac{\vartheta_{\max}}{\vartheta'_{\min}}. \quad (52)$$

Исключив из (51) и (52) ϑ'_{\min} , получаем

$$\vartheta'_{\max} = \frac{\frac{a}{\theta} + \frac{b}{\theta_0}}{e - e^{-\zeta}} \quad (53)$$

Выражение (53) показывает, что превышение температуры двигателя при повторно-кратковременной работе меньше, чем ϑ'_{\max} при длительной в случае одной и той же нагрузки, что и естественно, так как за время пауз двигатель охлаждается. Обозначим соотношение

$$\beta = \frac{\vartheta'_{\max}}{\vartheta'_{\max}} = \beta > 1. \quad (54)$$

Тогда из (53) имеем

$$\beta = \frac{\vartheta'_{\max}}{\vartheta'_{\max}} = \frac{\frac{a}{\theta} + \frac{b}{\theta_0}}{\frac{a}{\theta} + \frac{b}{\theta_0}} = \frac{e - e^{-\zeta}}{e - e^{-\zeta}} \quad (55)$$

Делим числителя и знаменателя (55) на $e^{-\zeta}$. Получаем

$$\beta = \frac{1 - e^{-\zeta}}{1 - e^{-\zeta}} = \frac{1 - e^{-\zeta}}{1 - e^{-\zeta}} = \frac{1 - e^{-\zeta}}{1 - e^{-\zeta}} = \frac{1 - e^{-\zeta}}{1 - e^{-\zeta}} \quad (56)$$

где ζ — приведенная продолжительность включения.

Нужно отметить, что если в (56) положить $b = \infty$, то мы должны были бы иметь чисто кратковременный режим. В самом деле при $b = \infty$ равенство (56) переходит в равенство

$$\beta = \frac{1}{1 - e^{-\frac{a}{\theta}}}, \quad (45')$$

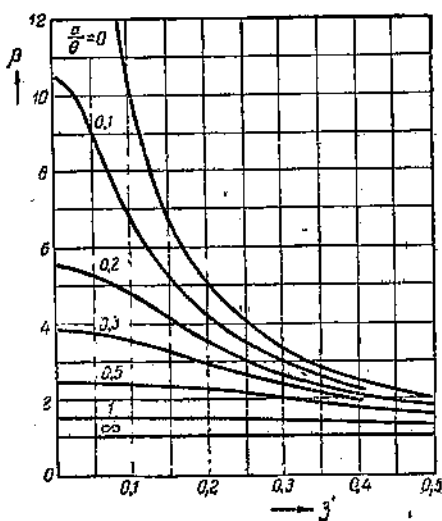
т. е. равенство, полученное нами раньше для кратковременного режима.

Таким образом при повторно-кратковременном режиме работы потери в машине могут быть повышены по сравнению с потерями при продолжительной работе в β раз. На фиг. 45 дана зависимость β от различных значений ζ' при повторно-кратковременной работе. Параметром кривых является величина $\frac{a}{\theta}$. Расширенный анализ этого вопроса дан в [Л. 40 и 41].

Кривые фиг. 45 дают зависимость мощности двигателя для длительного и повторно-кратковременного режимов работы лишь на базе нагрева. В действительности верхняя левая часть вышележащих кривых недостижима, так как такому повышению потерь в машине ставится предел не только нагревом, но другими электромагнитными свойствами, как-то: перегрузочной способностью, коммутацией и т. п.

Из изложенного видно, что условия работы двигателей повторно-кратковременного режима в тепловом отношении сильно разнятся от работы двигателей длительного режима за счет особенностей нагревания и охлаждения при частых пусках и остановках. Этот вопрос частично был нами освещен ранее применительно к двигателям кратковременного режима.

В периоды остановок (пауз) двигатель будет охлаждаться. Однако, если в двигателях постоянного тока охлаждение обмотки возбуждения почти не зависит от того, вращается ли машина или нет, то для охлаждения якоря вращение его очень существенно. Во время пауз неподвижный якорь будет охлаждаться слабо, а на охлаждении обмотки возбуждения отсутствие вращения скажется мало. Если бы мы для повторно-кратковременного режима



Фиг. 45. Изменение допустимой мощности двигателя в зависимости от ζ' .

работы взяли двигатель длительной мощности постоянного тока, то обмотка возбуждения его при полном использовании обмотки якоря и коллектора была бы недогрета. Для приведения в нужное соответствие теплового режима обмотки якоря, коллектора и обмотки возбуждения приходится конструировать для повторно-кратковременного режима специальные типы двигателей постоянного тока.

Аналогичные до некоторой степени условия мы имеем и в асинхронных двигателях. В них остановки будут относительно мало сказываться на постоянной времени нагрева статора, но значительно на постоянной времени нагрева ротора. Если учесть сказанное в предыдущем параграфе о перегрузках асинхронных двигателей, то приходим к заключению о необходимости проектировать совершенно особую серию асинхронных двигателей повторно-кратковременного режима. Эти двигатели вследствие частых пусков и реверсов должны иметь усиленную механическую конструкцию. Из дальнейшего будет также видно, что для получения нужной производительности, т. е. большего числа пусков (или реверсов) в час они должны также иметь уменьшенные маховые массы вращающихся частей.

У нас в СССР соответствующие серии двигателей выпускаются заводом «Динамо» с учетом особенностей кранового режима. Эти серии имеют марку КП и КПД (более поздняя серия) для крановых двигателей постоянного тока и марки КТ (крановый трехфазный) и КТО (крановый трехфазный открытый) для крановых двигателей трехфазного тока. Совершенно необходимой является серия металлургических двигателей (по образцу американской серии МД) для установки на вспомогательных механизмах металлургических заводов. Пока у нас эти механизмы обслуживаются менее совершенной серией КПД.

Подобно тому, как заводы по условиям стандартизации не выпускают двигателей любой продолжительной мощности, точно так же заводы не нормируют двигателей повторно-кратковременного режима для любой продолжительности включения. Как нашими, так и зарубежными заводами стандартизованы три следующих продолжительности включения: 15, 25 и 40%. Один и тот же тип двигателя имеет различные мощности при разных продолжительностях включения. Мощности для трех стандартных продолжительностей включения указываются в каталогах. За основную продолжительность включения считается $\zeta = 25\%$. Мощности двигателей для промежуточных значений ζ , не равных стандартным, могут быть найдены построением кривых фиг. 46. На нем для девяти типов двигателей КП отложены точками мощности их при стандартных значениях ζ . Соединяя точки кривыми, получаем характер изменения мощности данного типа двигателя в зависимости от ζ . Способ аналитического пересчета дан в следующем параграфе.

Из изложенного видно, что при $\zeta = 40\%$ от двигателей можно брать меньшую мощность, при $\zeta = 15\%$ — большую, чем при $\zeta = 25\%$. Поскольку за основную мощность считается мощность, соответствующая $\zeta = 25\%$, то она и указывается на щитке машины с указанием $\zeta = 25\%$. Значения мощностей при двух других продолжительностях включения указываются лишь в преискурантах.

Оперируя с двигателями повторно-кратковременного режима работы, нужно помнить, что каждому значению ζ соответствует свой номинальный ток

$$I_{N15} > I_{N25} > I_{N40}$$

Точно так же каждому значению ζ соответствует свое номинальное число оборотов двигателя в минуту

$$n_{N15} < n_{N25} < n_{N40}$$

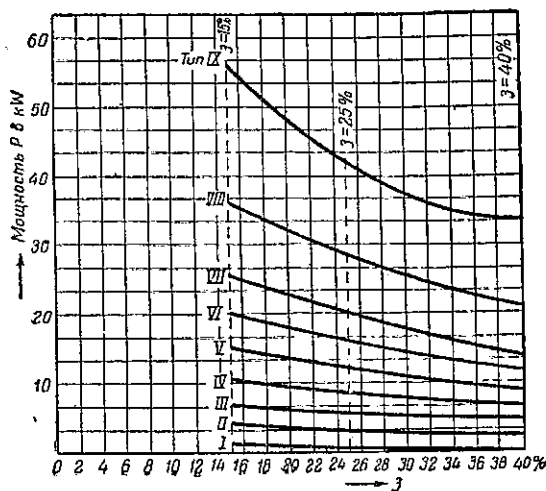
Последнее обстоятельство мало существенно в шунтовых двигателях постоянного тока и асинхронных, но имеет огромное значение в серийных и компаундных двигателях постоянного тока из-за резкого изменения в них скорости вращения с нагрузкой.

Совершенно естественно, что и перегрузочные способности двигателей повторно-кратковременного режима для различных ζ различны:

$$\lambda_{15} < \lambda_{25} < \lambda_{40} < \lambda_{100}$$

где λ_{100} соответствует перегрузке при длительном режиме, т. е. при $\zeta = 100\%$. Цифра перегрузки двигателя при повторно-кратковременном режиме без оговорок относится к $\zeta = 25\%$.

Как уже отмечалось выше, нормы требуют, чтобы перегрузочный момент всякого электродвигателя был не ниже 1,6. Следовательно, при $\zeta = 15\%$ перегрузочный момент любого двигателя повторно-кратковременного режима не может быть ниже 1,6. Нужно отметить, что закрытые машины без добавочной вентиляции могут иметь более высокие перегрузочные способности, чем открытые. Закрытие машины снижает и длительную и повторно-кратковременную мощность машины по термическим причинам без изменения ее электромагнитных свойств (реактивной э. д. с. опрокидывающей мощности и т. д.). При этом мощность, представлен-



Фиг. 46. Изменение мощности двигателя типа КП для разных ζ .

ная на щитке машины, снижается по сравнению с мощностью этой машины, как открытой. Это и ведет к некоторому повышению перегрузочной способности закрытых машин. Именно поэтому в ряде закрытых асинхронных машин встречается перегрузочная способность $\lambda_{\text{н}}$, равная 3, 4 и даже выше.

17. Пересчет мощности двигателей повторно-кратковременного режима от одной продолжительности включения к другой

Если известно значение мощности двигателя для одной продолжительности включения, то значение мощности для другой продолжительности включения может быть получено путем пересчета, если известно соотношение постоянных и переменных потерь при номинальной нагрузке. При этом необходимо исходить из условий равенства тепловых потерь за одни и тот же период времени.

Обозначим постоянные потери двигателя через q_{Nc} , а переменные потери при той продолжительности включения ζ_1 , для которой известна мощность двигателя P_1 , через q_v . Положим далее, что $q_v = \frac{q_{Nc}}{\gamma}$.

Определим допустимую полезную мощность P_2 при другом значении продолжительности включения ζ_2 . Пусть $P_2 = xP_1$. Из равенства потерь в обоих случаях можно написать, что

$$\left(q_{Nc} + \frac{q_{Nc}}{\gamma}\right)\zeta_1 = \left(q_{Nc} + \frac{q_{Nc}}{\gamma}x^2\right)\zeta_2,$$

так как переменные потери изменяются пропорционально квадрату силы тока, т. е. пропорционально квадрату мощности, откуда

$$x = \sqrt{\frac{\gamma\zeta_1 + \zeta_1 - \gamma\zeta_2}{\zeta_2}} = \sqrt{\gamma\left(\frac{\zeta_1}{\zeta_2} - 1\right) + \frac{\zeta_1}{\zeta_2}}. \quad (57)$$

Приведенное равенство (57) не учитывает различных условий теплоотдачи в покое и при вращении двигателя.

Положим, что степень ухудшения теплоотдачи в неподвижном состоянии по сравнению с нормальным вращением характеризуется коэффициентом $\delta = \frac{1}{\beta}$. Значения β были приведены выше. В таком случае для равенства потерь мы должны написать

$$\left(q_{Nc} + \frac{q_{Nc}}{\gamma}\right) \cdot \frac{\zeta_1}{\zeta_1 + \frac{1-\zeta_1}{\delta}} = \left(q_{Nc} + \frac{q_{Nc}}{\gamma}x^2\right) \cdot \frac{\zeta_2}{\zeta_2 + \frac{1-\zeta_2}{\delta}}.$$

Приводя к одному знаменателю и сокращая затем [на q_{Nc} , γ и δ], получим

$$x = \sqrt{(\gamma + 1) \frac{\zeta_1}{\zeta_2} \cdot \frac{\zeta_2(\delta - 1) + 1}{\zeta_1(\delta - 1) + 1} - \gamma}. \quad (57')$$

При $\delta = 1$ из (57') получается равенство (57). Практически величина δ для открытых машин может быть принята равной 2—3, для закрытых не выше 1,5.

Точные значения величины γ могут быть получены лишь от заводов, конструирующих двигатели, или посредством испытания; ориентировочные значения величины γ (для номинальной нагрузки) могут быть взяты следующие:

для серьезных двигателей постоянного тока 0,5—1,0

для шунтовых » » » 1,0—2,0

(меньшие цифры относятся к тихоходным, большие — к быстроходным)

для обыкновенных асинхронных двигателей 0,5—1,0

для крановых » » » 0,5—1,5

При небольших отклонениях ζ от нормальной продолжительности включения расчет мощности может быть проделан и по более простым приближенным формулам.

Очевидно, что при равенстве потерь при всех режимах

$$\Sigma q_{15} t_{15} = \Sigma q_{25} t_{25} = \Sigma q_{40} t_{40},$$

где Σq_{γ} — сумма всех потерь, в двигателе при соответствующем значении $\zeta\% = \gamma$, а t_{γ} — абсолютная продолжительность включения в минутах при тех же значениях ζ . Полагая, что механические, вентиляционные и железные потери меняются мало, можно написать (после сокращения на величину R — сопротивление обтекаемой током главной медной обмотки)

$$I_{N15}^2 t_{15} = I_{N25}^2 t_{25} = I_{N40}^2 t_{40},$$

где I_{N15} , I_{N25} , I_{N40} — номинальные токи соответствующих режимов.

Полагая, что токи примерно пропорциональны мощности, можно написать

$$P_{15}^2 \cdot t_{15} = P_{25}^2 \cdot t_{25} = P_{40}^2 \cdot t_{40}.$$

Так как за нормальную длительность одного цикла в повторно-кратковременном режиме принято $t_z = 10$ мин., то $t_{15} = 1,5$ мин., так как $(1,5:10) \cdot 100 = 15\%$; $t_{25} = 2,5$ мин., $t_{40} = 4$ мин., откуда

$$P_{15}^2 \cdot 1,5 = P_{25}^2 \cdot 2,5 = P_{40}^2 \cdot 4,0$$

или

$$P_{15} = P_{25} \sqrt{\frac{t_{25}}{t_{15}}} = P_{25} \sqrt{\frac{2,5}{1,5}} = 1,29 P_{25},$$

$$P_{40} = P_{25} \sqrt{\frac{t_{25}}{t_{40}}} = P_{25} \sqrt{\frac{2,5}{4,0}} = 0,79 P_{25}.$$

Длительная мощность двигателя

$$P_{100} = P_{25} \sqrt[3]{\frac{t_{25}}{t_{100}}} = P_{25} \cdot \sqrt[3]{\frac{2,5}{10}} = 0,5 P_{25}.$$

В общем случае приближенно

$$P_{\zeta_2} = P_{\zeta_1} \cdot \sqrt{\frac{\zeta_1}{\zeta_2}}. \quad (57'')$$

Равенство (57'') получается также из (57'), если мы в нем положим $x = P_{\zeta_2} : P_{\zeta_1}$, пренебрежем постоянными потерями, т. е. примем $\gamma = 0$ и возьмем $\delta = 1$.

Практически при пользовании формулой (57'') в нее необходимо вводить поправочный коэффициент χ :

$$P_2 = \chi \cdot P_1 \cdot \sqrt{\frac{\zeta_1}{\zeta_2}}. \quad (57''')$$

Практические значения коэффициентов χ для краевых двигателей по данным завода „Динамо“ приведены в табл. II.

Таблица II

Значения коэффициентов χ

Тип двигателя		$\zeta\%$					
		15	20	25	30	35	40
Асинхронный	Закрытый	1,04	1,03	1,0	0,99	0,95	0,93
	Открытый	1,01	1,01	1,0	0,98	0,97	0,96
Серийный постоянного тока	Закрытый	1,01	1,05	1,0	0,99	0,95	0,94
	Открытый	0,85	0,93	1,0	1,05	1,11	1,15

18. Практический выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы

К идеальному графику повторно-кратковременного режима фиг. 43 естественно применимы методы эквивалентного тока, момента или мощности. Очевидно, что длительная мощность двигателя P_a , необходимая для идеального графика повторно-кратковременного режима с постоянной мощностью во время работы P , по методу эквивалентной мощности будет равна

$$P_a = \sqrt{\frac{P^2 \cdot a}{a + b}} = P \sqrt{\frac{a}{a + b}} = P \cdot \sqrt{\zeta}. \quad (58)$$

Однако, как уже отмечалось выше, для повторно-кратковременного режима изготавливается особая серия двигателей с отнесенем мощностей к определенным продолжительностям включения. При

этом принимается следующий метод определения мощности. Положим, что мы имеем совершенно регулярно чередующийся график повторно-кратковременного режима типа, представленного на фиг. 47.

Применяя к периоду работы в одном цикле (без учета паузы) метод эквивалентного момента, получаем необходимый от двигателя эквивалентный момент повторно-кратковременного режима

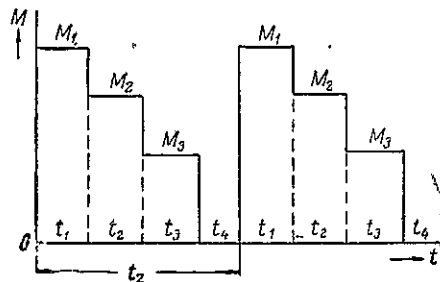
$$M_a = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad (58')$$

Далее необходимо найти по каталогу соответствующий двигатель для продолжительности включения

$$\zeta_x = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} \quad (58'')$$

Таким образом в определении M_a величина ζ уже непосредственно не участвует. Причина этого заключается в том, что каталожные моменты и мощности двигателей повторно-кратковременного режима уже отнесены к соответствующей продолжительности включения, т. е. в каталоге указаны не длительная мощность P_a формулы (58), а мощность P — правой части той же формулы. Если найденная ζ не соответствует стандартной, то должны быть сделаны пересчеты мощности двигателя на ζ_x согласно формулам (57) или (57'''). Выбранный таким образом двигатель обязательно должен быть проверен на перегрузку и пусковой момент.

Практически вопрос усложняется целым рядом обстоятельств. Во-первых, чисто регулярный график повторно-кратковременной нагрузки, повторяющийся из цикла в цикл, встречается редко. В действительности меняются длительности циклов ($a+b$), нагрузки за рабочий период цикла, длительности пауз (b). Во-вторых, сам характер повторно-кратковременного режима часто бывает неизвестен. Возьмем, например, работу пассажирского лифта, обслуживающего ряд этажей. Цикличность его работы установлена быть не может. То же самое можно сказать относительно самых разнообразных крановых устройств, обслуживающих цеха различных заводов. В этих случаях приходится идти на приближенные методы выбора мощности двигателя.



Фиг. 47. График повторно-кратковременного режима.

В случае переменных значений a и b за относительную продолжительность включения берут величину

$$\zeta = \frac{\sum a_x}{\sum a_x + \sum b_x}, \quad (48')$$

взятую за большой период работы. Однако величина любой суммы $(a_k + b_k)$ не должна быть больше 10 мин. В противном случае двигатель должен быть взят из серии двигателей длительного режима. Определение ζ по приведенной формуле в существующей установке может быть выполнено специальным счетчиком.

Практически существует два метода выбора мощности двигателей повторно-кратковременного режима для указанных условий: 1) старый — метод кратковременных мощностей и 2) новый — метод продолжительности включения или, правильнее говоря, метод эквивалентных длительных мощностей, так как, вводя продолжительность включения, мы уподобляем повторно-кратковременный режим длительному, хотя и не пользуемся непосредственно соответствующей формулой (58).

Исторически ранее всего для этой цели применяли метод кратковременных мощностей, т. е. уподобляли повторно-кратковременный режим работы кратковременному. Мощность двигателя выбирали по нормальным условиям работы без учета условий ускорения и замедления. Далее, целиком по статистическим данным, основанным на эксплуатационных данных, выбирали длительность кратковременной работы.

Иллюстрируем этот способ примером. Положим, что требуется выбрать мощность кранового двигателя для подъема груза. Определяем мощность, необходимую для нормальной работы

$$P = \frac{G \cdot v}{102 \cdot \eta} \text{ kW}, \quad (59)$$

где G — вес номинального груза в кг; v — скорость подъема в м/сек; η — к. п. д. передач, изменяющийся от 0,7 до 0,8.

В случае выбора двигателя для передвижения тележки крана или моста полезная работа двигателя складывается из работы катящегося трения по окружности колеса и работы скольжения трения по окружности цапфы. Номинальная мощность, необходимая для перемещения в установившемся режиме, будет

$$P = \frac{G_1 \cdot v}{102 \cdot R \cdot \eta} + \frac{G_1 \cdot d \cdot v}{2 \cdot 102 \cdot R \cdot \eta} \text{ kW}, \quad (59')$$

где G_1 — вес в кг крана или тележки, включая и полезный груз; v — скорость перемещения в м/сек; R — радиус колеса в см; d — диаметр цапфы в см; μ_1 — коэффициент трения катания, равный обычно 0,08 см; μ — коэффициент скользкого трения, равный 0,1; η — к. п. д. передачи, изменяющейся в зависимости от типа передачи:

$$\begin{aligned} \text{для тележки} &= 0,25 - 0,6, \\ \text{для моста} &= 0,4 - 0,7, \end{aligned}$$

Для привода подъема, моста или тележки берется двигатель кратковременной мощности P_k , вычисленной по формулам (59) или (59'). Длительность кратковременной мощности, не имеющая ничего общего с длительностью цикла, берется по заранее составленной по данным эксплуатации таблице (табл. III) в зависимости от рода исполнительного механизма. Полученная мощность двигателя должна быть проверена на пусковой и перегрузочный моменты. Отметим попутно, что по условиям возможности снижения перегрузочного момента асинхронного двигателя за счет колебания напряжения и вообще из-за более низкого его значения для асинхронных машин, обычно берут мощность асинхронного двигателя для подъема на 25% больше, чем при постоянном токе. Мощности асинхронных двигателей для перемещения крана или тележки берут на 25—50% больше, чем при постоянном токе.

Подобный метод выбора мощности двигателей для повторно-кратковременного режима сохранился до сих пор в США, частично в Англии и Франции, несмотря на его неточность и нецелесообразность. С некоторым уточнением (учет условий пуска и ускорения) этот метод применяется до сих пор в электротяге, где принято использовать двигатели часовой мощности. В нашем промышленном электроприводе этот метод для повторно-кратковременного режима теперь совершенно не применяется.

В 1923 г. этот метод в Германии был заменен методом продолжительности включения и внесен в нормы VDE (Германского союза электротехников). С 1929 г. нормами ВЭС этот последний метод введен и в СССР. В этом методе мощность двигателя подсчитывается, как указано выше, на базе формулы (58'), а в случае отсутствия необходимых данных более простым способом, например, для двигателя подъема по формуле (59).

Дальнейшая задача заключается в выборе продолжительности включения. Величина ζ находится по равенствам (58'') или (48'). Определение ее в реальных производственных условиях всегда может быть произведено специальными счетчиками. При невозможности подсчитать или получить достаточно точные значения ζ , для ориентировочного выбора также приходится пользоваться эксплуатационными данными. Нормальные значения для различных механизмов, определенные в условиях германских заводов, приведены в табл. III. Там же даны использовавшиеся ранее данные для длительности кратковременной работы.

Таблица III

I группа

1. Редко пускаемые поворотные, катящиеся и порталные краны, разгрузочные мосты при спуске груза без тока, малые подъемники, слабо используемые краны в машинных помещениях, складах, краны для паровозов,
2. Слабо используемые шлепферы в прокатных заводах, большая часть приспособлений для передвижений, как поворотные круги, шпиль, подвижные платформы и т. д.
3. Передвижные мосты, шлюзовые ворота, щиты и плотины,

4. Умеренно напряженные подъемники для грузов и людей до 20 подъемов в час на фабриках, в столовых, жилых домах, больницах, гостиницах и торговых помещениях.

Подъем, кран, тележка, поворот $\zeta = 0,15$; $t_k = 30$ мин.

II группа

1. Краны мастерских и умеренно напряженные складские краны:

Подъем, тележка $\zeta = 0,15$; $t_k = 30$ мин.

Кран $\zeta = 0,15 - 0,25$; $t_k = 30 - 60$ мин.

III группа

1. Почти все краны для штучных грузов в портах.

2. Мало используемые краны в промышленных установках, как: краны в мастерских, литейные краны, тяжелые установочные краны и краны на верфях.

Подъем, кран: $\zeta = 0,15 - 0,25$; $t_k = 30 - 60$ мин.

Тележка $\zeta = 0,15$; $t_k = 30$ мин.

IV группа

Кран в эллингах:

Подъем $\zeta = 0,15 - 0,25$; $t_k = 30 - 60$ мин.

Краны $\zeta = 0,25$; $t_k = 60$ мин.

Тележка $\zeta = 0,15$; $t_k = 30$ мин.

V группа

1. Коксовыткатыватели.

2. Загрузочные машины сталелитейных цехов.

3. Мало употребляемые краны для смены прокатных валков и легкие подъемные столы при станах.

Кран $\zeta = 0,25$; $t_k = 60$ мин.

Подъем тележки, поворот $\zeta = 0,15 - 0,25$; $t_k = 30 - 60$ мин.

VI группа

1. Большая часть мало напряженных, поворотных, катящихся и порталных кранов для массовых грузов (уголь, руда, сталь и т. п.), краны в гаванях с грейфером для небольших масс, металлургические краны при дневной и ночной работе погрузки шлака и т. п., в особенности, если они работают с подъемным электромагнитом, краны для опок, загрузочные машины, легкие ролбанги и т. д.

2. Средние напряженные подъемники для людей и грузов (от 20 до 30 подъемов в час) на фабриках, в столовых, гостиницах и торговых помещениях.

Подъем $\zeta = 0,25$; $t_k = 60$ мин.

Кран, тележка, поворот $\zeta = 0,15$; $t_k = 30$ мин.

VII группа

Тяжелые краны на верфях, исполинские краны с большой высотой подъема.

Подъем, поворот $\zeta = 0,25$; $t_k = 60$ мин.

Тележка $\zeta = 0,15 - 0,25$; $t_k = 30 - 60$ мин.

VIII группа

1. Миксеры и литейные краны в сталелитейных.

2. Когтевые и специальные краны для подъема железа в прокатных заводах.

Подъем, тележка $\zeta = 0,25$; $t_k = 60$ мин.

Кран $\zeta = 0,25 - 0,4$; $t_k = 60 - 90$ мин.

IX группа

Поворотные, катящиеся и порталные краны с грейферами для средних и больших масс.

Подъем $\zeta = 0,25 - 0,4$; $t_k = 60 - 90$ мин.

Кран, тележка, поворот $\zeta = 0,15$; $t_k = 30$ мин.

X группа

1. Краны для болванок и изложниц в сталелитейных.

2. Кран для томильных колодцев с поворотными клещами, кантовальные приспособления и тяжелые рольганги у блюмингов:

Подъем, тележка $\zeta = 0,25 - 0,4$; $t_k = 60 - 90$ мин.

Кран $\zeta = 0,4$; $t_k = 90$ мин.

XI группа

Разгрузочные мосты с грейферами для средних и больших мощностей:

Подъем $\zeta = 0,25 - 0,4$; $t_k = 60 - 90$ мин.

Кран, тележка $\zeta = 0,4$; $t_k = 90$ мин.

Платформа; $\zeta = 0,15$; $t_k = 30$ мин.

XII группа

1. Управляемые без специальных мер предосторожности особо важные для производства или подвергаемые действию высоких температур рабочие машины для дневной и ночной работы: тяжелые коксовыткатыватели, краны томильных колодцев, стриппер-кран, тяжелые литейные краны, подъемные столы и рольганги, двигатели для установки валков, кантовальные приспособления и копры с подъемными магнитами.

2. Сильно напряженные подъемники для людей и грузов при массовых поездках (от 30 до 50 в час) на фабриках, в столовых, гостиницах, торговых помещениях, станциях, метрополитенах и т. д.

Подъем $\zeta = 0,4$; $t_k = 90$ мин.

Кран и тележка $\zeta = 0,15$; $t_k = 30$ мин.

XIII группа

Стриппер-кран с поворотными клещами в сталелитейных.

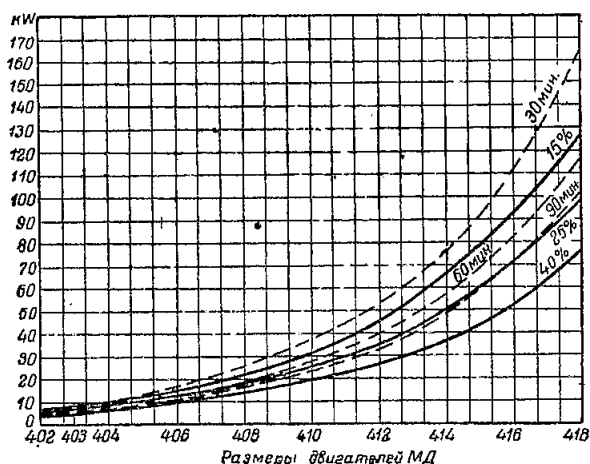
Подъем, кран, тележка $\zeta = 0,4$; $t_k = 90$ мин.

Поворот $\zeta = 0,15$; $t_k = 30$ мин.

При пользовании табл. III нужно иметь в виду, что в наших стахановских условиях работы относительные продолжительности включения электроприводов выше германских. Соответствующие измерения у нас до сих пор в нужном объеме не производились.

Сопоставляя метод кратковременной мощности и метод продолжительности включения, нужно отметить, что принципиально последний метод является более соответствующим существу дела, так как он базируется на совершенно реальной величине ζ , показывающей, какую часть времени двигатель загружен или включен. Если бы мы могли определить график нагрузки и применить к нему метод эквивалентного тока, то решение было бы вполне правильно, если не считаться с некоторыми неточностями этого метода. Метод кратковременной мощности основан в первую очередь на статистических данных. Имевшее место длительное его применение на практике было вызвано исключительно удобствами испытания двигателей этого рода на динамостроительном заводе. При сдаче двигатель полностью нагружался на определенное, фиксированное на его щитке, время. При выборе двигателя по продолжительности включения испытание длится значительно дольше. Так, согласно нормам ВЭС при нерегулярно распределенных рабочих периодах длительность испытания двигателя повторно-кратковременного режима устанавливается в 8 час.

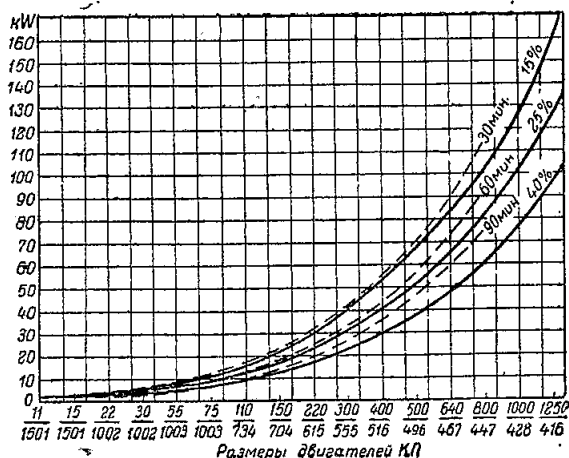
Опыт показал, что выбор мощности двигателя на этой основе вел к плохому использованию двигателей в одних случаях и к перегрузке в других. Наиболее детальное изучение этого вопроса



Фиг. 48. Зависимость между длительностью кратковременной работы t_k и ζ для двигателя типа КП.

Прежде всего необходимо подчеркнуть, что никакой определенной связи между длительностью кратковременной работы и продолжительностью включения в различных типах двигателей нет.

На фиг. 48 и 49 представлены для разных типов двигателей постоянного тока мощности при кратковременной работе и при повторно-кратковременной. Кривые фиг. 49 построены для закрытых крановых двигателей типа КП завода «Динамо». Кривые фиг. 48 построены для двигателей металлургического типа постоянного тока в изготовлении ГЭС. Цифры, отложенные по оси абсцисс, в обоих случаях относятся к характеристике типа. В то время как в американских типах двигателей 90-минутная мощность соответствует примерно



Фиг. 49. Зависимость между t_k и ζ для американских двигателей металлургического типа.

относятся к характеристике типа. В то время как в американских типах двигателей 90-минутная мощность соответствует примерно

$\zeta = 25\%$, в двигателях «Динамо» 90-минутная мощность получается при больших продолжительностях включения.

Отсутствие определенной связи длительности кратковременной мощности и продолжительности включения подтверждается также данными табл. IV.

Таблица IV
Соотношение между ζ и длительностью кратковременной работы t_k для разных типов двигателей

ζ в %	Асинхронный двигатель						Серийный двигатель постоянного тока			
	Тип А закрытый		Тип В закрытый		Тип С открытый		Тип D закрытый		Тип E откр. перт.	
	kW	мин.	kW	мин.	kW	мин.	kW	мин.	kW	мин.
15	27,0	25	22,8	20	35,0	11	35,0	32	51,8	18
20	23,0	36	20,4	30	30,5	17	30,3	45	49,4	23
25	20,2	47	17,9	45	27,0	24	27,0	61	47,5	29
30	18,4	58	16,3	60	24,3	33	24,5	78	45,6	35
35	16,6	70	14,9	77	22,1	45	21,8	99	44,1	40
40	14,8	81	13,7	93	20,0	57	20,0	126	43,2	46

Цифры табл. IV показывают, что, в то время как у типа А $\zeta = 15\%$ соответствует 25 мин., у типа С—11 мин., типа D—32 мин. и типа E—18 мин. Соотношение совершенно различное. В общем нужно сказать, что малые двигатели и двигатели, открытые при данной кратковременной мощности, имеют большее ζ , чем большие и закрытые. Объясняется это тем, что в покое маленький двигатель охлаждается быстрее, чем большой, так как выделяемое в двигателе тепло при повышении мощности двигателя растет быстрее, чем охлаждающая поверхность. Очевидно, что если мы возьмем два металлических шара и нагреем их до одинаковой температуры, то охлаждение меньшего шара будет идти быстрее, так как тепло пропорционально объему, а излучение — поверхности.

Чем больше мощность двигателя, тем точнее должно быть определено значение ζ . В больших типах при неправильно выбранной величине ζ , перегрев может быть скорее, чем в малых типах. В то время как в малых двигателях мощность весьма мало зависит от ζ в двигателях большой мощности уменьшение ζ ведет к значительному повышению мощности.

Трудности выбора мощности двигателей для кранов, работающих почти всегда с переменной и во многих случаях неполной нагрузкой, повели к тому, что фирма АЕГ предложила для этих условий выбирать двигатель по так называемым рядам с учетом продолжительности включения и относительной нагрузки. В соответствующих каталогах АЕГ для каждого типа двигателя указывается мощность, соответствующая четырем рядам (I, II, III и IV).

I ряд соответствует максимальной возможной мощности двигателей в отношении электромагнитных свойств и ограничен для двигателей постоянного

тока коммутацией, для асинхронных двигателей — перегрузочным моментом. Под относительной нагрузкой понимается величина

$$\gamma = \frac{M_0 + M}{2M} = \frac{1 + \frac{M_0}{M}}{2}$$

где M_0 — потребный от двигателя момент при отсутствии полезного груза, а M — вращающий момент при подъеме груженого крюка или при передвижении груженого моста или тележки.

В зависимости от величины γ и ζ фирма AEG рекомендует следующие ряды.

Нагрузочные ряды двигателей повторно-кратковременного режима

Относительная нагрузка γ	ζ в %		
	0,6	0,8	1,0
15	I	I	II
25	II	0,52 (II+III)	III
40	III	0,52 (III+IV)	IV

Выражение 0,52 (II + III) означает, что двигатель при относительной нагрузке $\gamma = 0,8$ и $\zeta = 25\%$ может развивать мощность, равную 0,52 от суммарной мощности этого двигателя для II и III рядов при $\zeta = 25\%$.

В нормальных мостовых кранах γ наиболее часто имеет значение: для подъема 0,55—0,7; для тележки 0,6—0,7; для моста 0,7—0,95. Для тяжелых кранов подъем 0,7—0,95; тележка 0,85—0,97. Если вес крюка будет G_0 , а вес груза G , то при к. п. д. передач, равном 0,65—0,90, значение γ будет:

$\frac{G_0}{G}$	γ
0—0,1	0,6
0,1—0,5	0,8
0,5—1,0	1,0

Необходимо отметить, что метод продолжительности включения в чистом виде не учитывает возможного числа пусков электропривода в час, т. е. не учитывает в достаточной мере работы живых сил. Как уже отмечалось выше, нормы, фиксируя максимальную допустимую продолжительность цикла в 10 мин., тем самым как бы исходят из шести пусков в час. В действительности число циклов бывает значительно больше. Так краны мастерских имеют обычно 100—120 включений в час. Литейные краны 150—200. Краны металлургической промышленности 300—400. Вспомогательные механизмы прокатных цехов 600—1 000 и более. У вспомогательных механизмов современных реверсивных обжимных прокатных станков — блумингов — число включений в час доходит до 2 000. Для выбора двигателей и аппаратуры в них различают обычно следующее число включений в час: 30 (краны центральных элек-

трических станций), 120 (транспортные и монтажные краны), 240 (литейные краны), 240—300 (металлургические краны), 600—рольганги тяжелых станов, 1 000 и выше — механизмы блуминга. Увеличение числа циклов в час повышает длительность периодов ускорения по отношению ко всему рабочему времени. В отдельных случаях в один регулярно чередующийся цикл может входить несколько включений двигателя. В периоды разгона момент двигателя имеет обычно большее значение, чем при установившейся скорости, так как двигатель должен развивать дополнительный момент, необходимый для разгона маховых масс. Следовательно, большее число включений при том же значении ζ ведет к двигателю большей мощности и обратно. В свою очередь для определенного габарита двигателя эквивалентная мощность при большем числе циклов снижается.

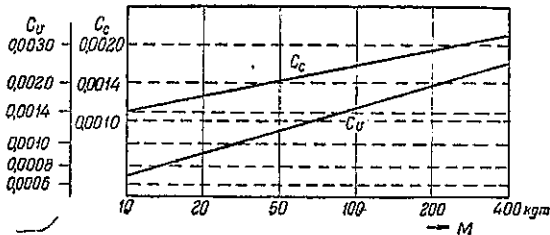
Значение этого вопроса может быть объяснено следующим примером. Прибор, регистрировавший в одном случае продолжительность включения рабочих рольгангов у современного блуминга, дал среднее за час $\zeta = 0,356$ и число включений в час 110. Хотя действительное значение ζ за весь период — 0,356, однако, при таком большом числе включений в час двигатель, выбранный по продолжительности включения $\zeta = 40\%$, оказывается все-таки недостаточным, так как значительное число ускорений и пусков вызывает необходимость повышения мощности двигателя. В отдельные периоды ζ достигает 47,8%. Для такого весьма напряженного привода двигатель, выбранный по нормальной рабочей мощности (вращение рольганга со слитком с нормальной скоростью), приходится брать практически для $\zeta = 100\%$.

Для учета влияния на мощность двигателя числа включений необходимо уменьшать номинальный момент двигателя (или номинальную мощность P_N), указанные в каталогах для определенной продолжительности включения. Для крановых двигателей (с числом включений в час от 100 до 150) можно принять, что уменьшение допустимого эквивалентного момента при данном значении ζ происходит почти пропорционально увеличению числа пусков двигателя. Это положение практически справедливо лишь при не очень высоких значениях пускового момента двигателя (примерно не выше $2 M_N$). M_x , т. е. допустимый для двигателя номинальный момент при $\zeta = 25\%$ и числе циклов в час больше шести, равен

$$M_x = (1 - c \cdot Z \cdot y) \cdot M_{N25}, \quad (60)$$

где M_{N25} — номинальный момент двигателя при $\zeta = 25\%$, взятый по каталогу без учета работы ускорения; Z — число циклов в час; y — число ускорений в 1 цикл; c — некоторая характеристическая машинная постоянная, представленная на фиг. 50 для серийного постоянного тока — c_c и для трехфазного асинхронного — c_a крановых двигателей. При пользовании (60) нужно иметь в виду, что в числе ускорений y учитываются лишь ускорения под током,

ускорения без тока приниматься во внимание не должны. Характеристическая постоянная c дана для $\zeta=25\%$. В случае других значений ζ вращающие моменты двигателей нужно приводить к $\zeta=25\%$, получая искомое значение c .



Фиг. 50. Характеристическая постоянная c для серийных постоянного тока и асинхронных крановых двигателей при $\zeta=25\%$.

Отметим еще введенный Шибелером один из способов учета допустимого числа пусков электропривода в час при пользовании методом относительной продолжительности включения. Положим, что при пуске длительностью t_p двигатель нагружается мощностью P_p , а затем работает в течение t_r с мощностью P_r . Длительность

цикла равна t_2 . Этот режим работы может быть заменен работой в течение периода $(t_p + t_r)$ с постоянной мощностью P_c . Эквивалентная мощность для цикла будет

$$P_c = \sqrt{\frac{P_p^2 t_p + P_r^2 t_r}{t_2}} = \sqrt{\frac{P_r^2 (t_p + t_r)}{t_2}}$$

При $P_p = P_r \cdot x$ получим

$$\sqrt{P_r^2 x^2 t_p + P_r^2 t_r} = P_r \cdot \sqrt{x^2 \cdot t_p + t_r} = P_c \cdot \sqrt{t_p + t_r}$$

Беря отношение P_c к P_r , имеем

$$\frac{P_c}{P_r} = \sqrt{\frac{x^2 \cdot t_p + t_r}{t_p + t_r}} = \sqrt{\frac{x^2 \cdot t_p + t_r + t_p - t_p}{t_p + t_r}} = \sqrt{\frac{t_p(x^2 - 1)}{t_p + t_r} + 1}$$

Так как $\frac{t_p + t_r}{t_2} = \zeta$, то, вводя в полученное равенство ζ и t_2 , получим

$$\frac{P_c}{P_r} = \sqrt{\frac{t_p(x^2 - 1)}{\zeta \cdot t_2} + 1}$$

Полагая, что число пусков в час равно Z , можем написать

$$\frac{t_p}{t_2} = \frac{t_p \cdot Z}{3600} \quad \text{или} \quad t_2 = \frac{3600}{Z}$$

Вводя это отношение в предыдущее равенство, имеем

$$P_c = P_r \cdot \sqrt{\frac{t_p \cdot Z(x^2 - 1)}{3600 \zeta} + 1} = P_r \cdot \sqrt{\frac{t_p \cdot Z}{\zeta \%} \cdot \frac{x^2 - 1}{36} + 1}$$

Так как практически обычно $x=2$ и $\frac{x^2-1}{36} = \frac{1}{12}$,

то

$$P_c = P_r \cdot \sqrt{\frac{t_p \cdot Z}{12 \cdot \zeta\%} + 1} . \quad (60')$$

Для определения необходимой мощности двигателя повторно-кратковременного режима P_c Шибелер предлагает пользоваться приведенной формулой, где P_r определяется по нормальной нагрузке. Так, в случае крана P_r находится по формуле (59) или (59').

Ряд дальнейших уточнений метода продолжительности включения можно найти в книге автора «Применение двигателей в промышленности», ч. I, стр. 23—27.

ГЛАВА III

ОСНОВЫ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

19. Значение динамики в теории электропривода

Необходимость достижения высокой производительности отдельных исполнительных механизмов и целых цехов предъявляет определенные требования в отношении осуществления различных производственных процессов по возможности в кратчайший срок. С этой точки зрения в электроприводе большое значение имеют длительности времени пуска и торможения, перехода от одной скорости к другой и т. д. В электроприводах, пускаемых часто (повторно-кратковременный режим), эти времена должны быть сведены к минимуму. Особенно большое значение указанное обстоятельство имеет при непрерывных производственных процессах и в схемах их комплексной автоматизации.

Характер протекания пусковых, тормозных и других переходных процессов электропривода определяется прежде всего законами изменения движущих моментов и моментов сопротивления электрифицируемого агрегата. Совместное действие этих моментов и определяет собой поведение электропривода, т. е. закон изменения скорости при пуске, торможении, изменении нагрузки, переходе от одной скорости к другой и т. д. Необходимые выводы получаются путем решения основных уравнений движения, даваемых механикой.

Таким образом в основе теории электропривода лежит прежде всего динамика работы электропривода, увязанная с механическими свойствами электродвигателей. В данной главе мы рассмотрим основы применения динамики к решению задач электропривода. Эти предварительные сведения совершенно необходимы для уяснения условий работы электродвигателя на различных механических характеристиках, что составляет предмет следующих глав.

Рассмотренные далее вопросы совместного поведения электроприводов с исполнительными механизмами в переходных режимах, базирующиеся на разнообразных свойствах тех и других, и составляют главнейшую и основную часть теории электропривода.

Рассмотрение динамики электропривода дает нам также возможность определения эквивалентной по нагреву мощности двигателя и, следовательно, возможность проверки выбираемого га-

барита двигателя. Эквивалентный момент, как указано выше, равен

$$M_b = \sqrt{\frac{\int_0^{t_2} M_{dx}^2 dt}{t_2}} \approx \sqrt{\frac{\sum_0^{t_2} M_{dx} \cdot \Delta t_x}{t_2}},$$

где $M_{dx} = f(t)$ представляет зависимость развиваемого двигателем вращающего момента во времени. Кривая момента двигателя $M_{dx} = f(t)$ находится решением уравнений динамики на основании кривой момента нагрузки $M_m = \psi(t)$, механических характеристик двигателя и некоторых параметров электропривода и рабочей машины. Лишь при постоянной нагрузке и постоянной скорости электропривода $M_{dx} = M_m = \psi(t)$. Во всех остальных случаях это равенство не соблюдается. Разность между M_{dx} и M_m покрывается работой живых сил.

Зависимость $M_{dx} = f(t)$ и находится решением уравнений динамики привода.

20. Уравнения движения электропривода в случае вращательных движений элементов электрифицированного агрегата

Поведение электропривода с исполнительным механизмом зависит от соотношения движущих моментов (сил) и моментов (сил) сопротивления и от величин маховых масс рассматриваемой системы.

Как и всякая механическая система, электрифицированный агрегат подчиняется основному уравнению вращательного движения, вытекающему из принципа Д'Аламбера.

Наиболее общий вид уравнения движения привода удобнее всего получить, исходя из второй формы уравнений Лагранжа, так как эта форма не требует знания характера промежуточных связей.

Применительно к вращательному движению можно написать

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \omega} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = M, \quad (61)$$

где T — кинетическая энергия системы; α — обобщенный угол поворота; ω — обобщенная угловая скорость и M — обобщенный вращающий момент.

При этом

$$T = J_{(\alpha)} \cdot \frac{\omega^2}{2}, \quad (62)$$

где $J_{(\alpha)}$ — приведенный момент инерции системы, зависящий от угла (α) .

Как известно, обобщенными координатами материальной системы называются такие величины, задание которых вполне определяет положение всех точек системы. Число независимых обобщенных координат, определяющих положение системы, называется

ся числом степеней свободы. В большинстве применений электропривода мы имеем дело с системами с одной степенью свободы. Наличие в равенстве (61) двух обобщенных координат ω и α не меняет положения дела, так как α и ω зависимы и $\alpha = f(\omega)$.

Взяв производную от выражения (61), получим

$$\frac{d}{dt} \left[J_{(\alpha)} \cdot \omega \right] - \frac{\omega^3}{2} \cdot \frac{dJ_{(\alpha)}}{d\alpha} = J_{(\alpha)} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega \cdot \frac{dJ_{(\alpha)}}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} - \frac{\omega^3}{2} \cdot \frac{dJ_{(\alpha)}}{d\alpha} = M.$$

Так как $\frac{d\alpha}{dt} = \omega$, то имеем

$$M = J_{(\alpha)} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ_{(\alpha)}}{d\alpha} \cdot \frac{\omega^3}{2}. \quad (63)$$

Выражение (63) охватывает случаи движения привода при постоянном и изменяющемся моменте инерции системы. Более редкие случаи переменного момента инерции будут далее рассмотрены особо. Пока же будем рассматривать случаи $J_{(\alpha)} = \text{const} = J$.

При постоянном моменте инерции второй член правой части (63) превращается в нуль, и мы получаем вид уравнения движения, наиболее часто применяемый в электроприводе

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (64)$$

где M представляет результирующий вращающий момент системы электропривода с исполнительным механизмом.

Величина $J \frac{d\omega}{dt}$ в этом случае носит название динамического момента M_d . Последний может быть положительным и отрицательным в зависимости от знака результирующего момента M . Равенство (64) может быть отнесено как к угловому ускорению двигателя, так и к угловому ускорению какого-либо звена исполнительного механизма. При этом к соответствующим скоростям должны быть отнесены как результирующий момент M , так и приведенный момент инерции J . Наиболее часто уравнения движения электропривода относят к угловой скорости двигателя.

В этом случае уравнение движения можно написать в виде

$$\pm |M_d| \pm |M_m| = J \cdot \frac{d\omega_d}{dt}. \quad (65)$$

В равенстве (65) M_d — вращающий (или тормозящий) момент двигателя; M_m — статический момент сопротивления рабочей машины, отнесенный к валу двигателя; J — приведенный к оси двигателя момент инерции всей системы; $\frac{d\omega_d}{dt}$ — угловое ускорение двигателя. Знак перед M_d и M_m зависит от того, является ли соответствующий момент в рассматриваемом режиме для системы движущим или тормозящим.

Под статическим моментом исполнительного механизма M_s понимается вращающий момент рабочей машины на ее валу, определяемый статическими силами. Если этот момент пересчитан на угловую скорость двигателя, то он называется приведенным статическим моментом (M_m).

Статический момент создается различными статическими силами—силами трения, разрезания, вытягивания, скручивания, сжатия, растяжения, кручения, веса. В зависимости от производственного процесса и свойств рабочей машины статический момент во время работы может оставаться постоянным, может зависеть от скорости, пути, времени и т. д. В зависимости от направления действия статический момент для данного состояния системы может в некоторых случаях вместо тормозящего действия оказывать движущее действие, т. е. может способствовать вращению системы. С этой точки зрения все статические моменты по предложению Вешеневского [Л. 7 и 42] могут быть разбиты на две категории:

- 1) категория реактивных моментов;
- 2) категория потенциальных моментов.

В первую категорию входят статические моменты: от трения, от резания (металла, дерева, бумаги и т. д.), от сжатия (газа, воздуха), от растяжения и скручивания (пряжа) неупругих тел. Эти моменты в исполнительном механизме создаются силами реакции. Они всегда противодействуют вращению электрифицированного агрегата, т. е. всегда являются тормозящими. Поскольку они направлены всегда против направления вращения двигателя, они являются отрицательными. Однако в практике электропривода принято в уравнении движения привода не включать знак статического момента в величину M_m (или M_s). Тормозное действие таких моментов учитывается знаком минус, стоящим перед вторым членом левой части уравнения (65). Приняв эту условность, мы реактивные моменты всегда будем считать положительными.

Во вторую категорию включаются моменты от веса, сжатия, растяжения и скручивания упругих тел. Эти процессы связаны с изменением потенциальной энергии отдельных элементов системы, почему соответствующие моменты и могут быть названы потенциальными. В зависимости от направления вращения двигателя потенциальные моменты могут противодействовать вращению электропривода или способствовать ему. В соответствии с принятой выше условностью потенциальный момент, противодействующий направлению вращения двигателя (подъем груза) мы будем считать положительным, способствующий (спуск груза, растяжение пружины) — отрицательным. При движущем моменте двигателя и положительном статическом моменте уравнение движения привода будет иметь вид,

$$M_d - M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (66)$$

При том же характере момента двигателя и при отрицательном статическом моменте уравнение получит вид

$$M_a \mp M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (67)$$

В первом, вообще наиболее частом, случае работы всей массы электроприводов возможны следующие варианты поведения системы:

$$1. \quad M_a = M_m; \frac{d\omega}{dt} = 0;$$

система находится в покое или в установившемся равномерном движении.

$$2. \quad M_a > M_m; \frac{d\omega}{dt} > 0;$$

система находится в ускорении.

$$3. \quad M_a < M_m; \frac{d\omega}{dt} < 0;$$

система замедляется.

В случае равенства (67), соответствующего движущему моменту двигателя и отрицательному статическому моменту, система могла бы ускоряться теоретически до бесконечности (практически до недопустимых скоростей), если бы момент двигателя сохранял свое направление, что и может иметь место в случае нормального включения серийного двигателя постоянного тока. Однако по достижении некоторой скорости двигателя почти всех типов переходят на генераторный режим, тем самым момент двигателя при некоторой скорости становится для системы тормозящим—отрицательным. Система достигает некоторой скорости, соответствующей условию

$$-M_a \mp M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0.$$

С этого момента начинается установившееся движение электропривода при некоторой неизменной скорости.

Отрицательный тормозящий момент двигателя требуется в целом ряде случаев: сюда относится необходимость автоматической остановки двигателя в определенном месте, необходимость быстрой остановки в целях повышения производительности (для более быстрого перехода к следующему циклу), необходимость остановки в случае аварии по соображениям безопасности, необходимость спуска тяжелых грузов при определенной скорости и т. п. Во всех этих случаях момент двигателя должен быть отрицательным. В зависимости от знака статического момента уравнение движения привода для указанного случая примет вид

$$-M_a \pm M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (68)$$

С учетом всех возможных режимов работы двигателя и обеих возможных категорий статического момента обобщенное уравнение движения электропривода примет вид

$$\pm M_d \pm M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (65')$$

Введение в уравнение движения привода знаков перед моментами является весьма удобным, так как сразу показывает возможный знак динамического момента, т. е. показывает, должна ли рассматриваемая система ускоряться или замедляться. При этом работа двигателя может характеризоваться следующими равенствами:

а) Установившаяся работа при положительном статическом моменте

$$M_d - M_m = 0, \quad (69)$$

б) Пуск в ход и работа при положительном переменном статическом моменте

$$M_d - M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (70)$$

В случае пуска $M_d > M_m$, в случае работы M_d может быть численно больше, меньше и равным M_m .

в) Торможение при том же характере момента

$$-M_d - M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (71)$$

д) Установившаяся работа двигателя при отрицательном статическом моменте

$$-M_d + M_m = 0. \quad (72)$$

е) Пуск в ход, торможение и работа при отрицательном статическом моменте

$$-M_d + M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (73)$$

Выше было указано, что величина $J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ называется динамическим моментом. Так как J имеет размерность kgm sec^2 , ω — размерность sec^{-1} и время — sec , то $J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ имеет размерность момента — kgm .

В общем случае (при $J = \text{const}$)

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_j = \pm M_d \pm M_m \quad (65'')$$

В зависимости от соотношений величин M_d и M_m и знаков перед ними динамический момент может быть положительным или отрицательным.

Положительным значение динамического момента будет при ускорении ($\frac{d\omega}{dt} > 0$), когда он противодействует вращению двигателя, и отрицательным при замедлении ($\frac{d\omega}{dt} < 0$), когда он способствует вращению электрифицированного агрегата. При этом понятие о знаке для динамического момента полностью соответствует принятому понятию о знаке для статического момента.

Динамический момент существует лишь при изменении скорости привода (пуск в ход, торможение, изменение нагрузки или скорости в сторону увеличения или уменьшения). При неизменной скорости $M_j = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0$.

Наряду со статическим и динамическим моментами можно говорить о статической и динамической мощности.

Умножим равенство (65'') на ω_d . Получим

$$\pm M_d \cdot \omega_d \pm M_m \cdot \omega_d = M_j \cdot \omega_d. \quad (74)$$

Каждый член равенства (67) представляет мощность $P_d = M_d \cdot \omega_d$ — мощность двигателя, $M_m \cdot \omega_d = P_m$ — статическая мощность; $M_j \cdot \omega_d = P_j$ — динамическая мощность

$$\pm P_d \pm P_m = P_j. \quad (74')$$

В общем случае каждая из указанных мощностей может получать как положительные, так и отрицательные значения. Подробнее это будет выяснено ниже.

Так как мощность равняется произведению вращающего момента на угловую скорость, то вращающий момент в килограммометрах

$$M = \frac{P \cdot 75}{\frac{2\pi n}{60} \cdot 736} = 0,975 \frac{P}{n}, \quad (75)$$

где P выражено в ваттах и

$$M = 975 \cdot \frac{P}{n},$$

если P выражено в киловаттах.

В отдельных случаях момент выражают в киловаттсекундах. Очевидно, что

$$M(\text{kWsec}) = \frac{M(\text{kgm})}{102}.$$

При больших мощностях двигателей M принято выражать в тонно-метрах.

$$M(\text{tm}) = \frac{M(\text{kgm})}{1000} = \frac{M(\text{kWsec})}{9,81}.$$

21. Приведение статических моментов

В уравнение движения электропривода входит приведенный статический момент рабочей машины M_m , отнесенный к валу двигателя. Приведение статического момента должно быть сделано из условия равенства статических мощностей на валу двигателя и рабочей машины с учетом потерь в промежуточных передачах. Если статический момент на валу рабочей машины M_s , а приведенный к валу двигателя статический момент M_m и если при скорости двигателя ω_d рабочая машина идет со скоростью ω_m , то при передаче энергии от двигателя к рабочей машине, например, при пуске агрегата в ход

$$M_m \cdot \omega_d \cdot \eta_p = M_s \cdot \omega_m \quad (76)$$

где η_p — к. п. д. промежуточных передач. Таким образом

$$M_m = M_s \cdot \frac{\omega_m}{\omega_d} \cdot \frac{1}{\eta_p} = M_s \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\eta_p}, \quad (76')$$

где k — передаточное число от двигателя к машине.

При наличии между двигателем и механизмом нескольких передач с передаточными числами k'_1, k'_2, \dots, k'_n и соответственно с их к. п. д. $\eta_{p1}, \eta_{p2}, \dots, \eta_{pn}$

$$M_m = M_s \cdot \frac{1}{k'_1 \cdot k'_2 \cdot \dots \cdot k'_n} \cdot \frac{1}{\eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \cdot \dots \cdot \eta_{pn}},$$

где каждое значение η_{px} должно соответствовать передаваемому через передачу моменту.

Очевидно, что приведенный статический момент в случае постоянного статического момента будет оставаться неизменным лишь при неизменном к. п. д. передач η_p .

Однако в отдельных случаях энергия передается от рабочей машины к двигателю. Это имеет место, например, в случае отрицательного действия потенциальных моментов, когда двигатель работает в тормозном режиме или в целях быстрой остановки привода или в целях получения определенной скорости работы. Типичным примером может служить подъем и спуск груза. Пусть статический момент груза G на подъемном барабане радиуса R будет $M_s = G \cdot R$. При подъеме груза энергия передается от двигателя к грузу. Приведенный к валу двигателя статический момент при подъеме

$$M_{m \uparrow} = M_s \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\eta_p}. \quad (77)$$

Если при спуске груза достаточной величины энергия передается от груза к двигателю, работающему в тормозном режиме, то

$$M_{m\downarrow} \cdot \omega_a = M_s \cdot \omega_m \cdot \eta_p \quad (77'')$$

$$M_{m\downarrow} = M_s \cdot \frac{1}{k} \eta_p \quad (77''')$$

Таким образом при одинаковых значениях η_p для обоих случаев

$$M_{m\downarrow} = M_{m\uparrow} \cdot \eta_p^2 \quad (78)$$

Аналогичные условия пересчета статических моментов должны иметь место и при реактивных моментах в случае работы двигателя в тормозном режиме. Так, в случае связи двигателя с рабочей машиной, имеющей статический момент M_s , зубчатой передачей с передаточным числом $k=1$ приведенный к валу двигателя статический момент при пуске будет $M_m = \frac{M_s}{\eta_p}$. В случае работы двигателя в тормозном режиме $M_m = M_s \cdot \eta_p$. Стало быть, для определения расчетного статического момента, приведенного к валу двигателя, нужно предварительно оценить режим работы двигателя и соответствующим образом учесть потери в передачах. В идеальной системе без потерь всегда

$$M_m = M_s \cdot \frac{1}{k} \quad (79)$$

В реальной системе с потерями к. п. д. передач в зависимости от режима работы электропривода может входить как в числитель, так и в знаменатель правой части равенства (79). Это обстоятельство нужно учитывать в дальнейшем при оперировании с приведенным статическим моментом. Необходимо отметить также, что к. п. д. передач не остается постоянным. В переходных режимах через передачу передается не только статический, но и динамический момент, а $\eta_p = f(M_m + M_s)$. Это обстоятельство усложняет расчет. Способы практического подсчета будут фиксированы далее после рассмотрения вопроса о приведении динамических моментов.

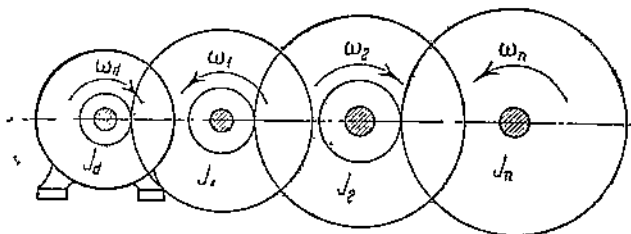
22. Приведение маховых масс вращательного движения к одной оси

В уравнение движения электропривода входит приведенный момент инерции системы J . Под приведенным моментом инерции понимается эквивалентный момент инерции рассматриваемой кинематической системы, отнесенный к некоторой угловой скорости или, как говорят, к одной оси. За эту ось чаще всего берут вал двигателя.

При приведении маховых масс (моментов инерции) мы должны исходить из тех соображений, что живая сила системы остается неизменной. Так как живая сила вращающихся тел $A_x = \frac{J_x \omega_x^2}{2}$, то в таком случае (фиг. 51) в идеальной системе без потерь

$$\frac{J \omega_d^2}{2} = \frac{J_d \omega_d^2}{2} + \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2} + \dots + \frac{J_n \omega_n^2}{2}, \quad (80)$$

где J — приведенный момент инерции всей системы, приведенной к валу двигателя; $J_1, J_2, J_3, \dots, J_n$ и $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ — соответственно моменты инерции и угловые скорости (при скорости двигателя ω_d) частей рабочей машины или передач на соответствующих осях; J_d и ω_d — момент инерции и угловая скорость вращающихся частей двигателя.



Фиг. 51. Некоторая кинематическая схема связи двигателя с исполнительным механизмом.

Следовательно, J_n представляет истинный момент инерции некоторого вращающегося звена рабочей машины или передачи. Очевидно, что

$$\left. \begin{aligned} J &= J_d + J_1 \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_d^2} + J_2 \cdot \frac{\omega_2^2}{\omega_d^2} + \dots + J_n \cdot \frac{\omega_n^2}{\omega_d^2} = J_d + J_1 \cdot \frac{n_{21}^2}{n_d^2} + J_2 \cdot \frac{n_{32}^2}{n_d^2} + \dots \\ &\dots + J_n \cdot \frac{n_{n,n}^2}{n_d^2} = J_d + J_1 \cdot \frac{1}{k_{21}^2} + J_2 \cdot \frac{1}{k_{32}^2} + \dots + J_n \cdot \frac{1}{k_{n,n}^2}, \end{aligned} \right\} (80')$$

где $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ — передаточные числа между осью двигателя и осями отдельных кинематических звеньев.

Моменты инерции отдельных кинематических звеньев, сидящих на одной оси и вращающихся с одинаковой угловой скоростью, естественно, складываются арифметически, ибо

$$A_x + A_y = \frac{J_x \omega_x^2}{2} + \frac{J_y \omega_y^2}{2} = \frac{(J_x + J_y) \cdot \omega_x^2}{2}, \quad (81)$$

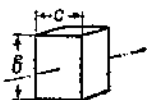
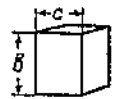
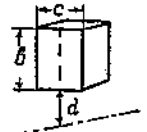
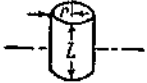
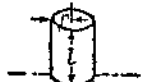
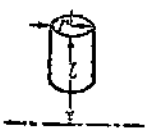

Момент инерции каждого отдельного вращающегося элемента J равен его массе m на квадрат радиуса инерции ρ

$$J = m \cdot \rho^2. \quad (82)$$

Момент инерции имеет размерность $\text{кгм} \cdot \text{сек}^2$.

Для сплошного круглого диска радиусом R , $\rho^2 = \frac{R^2}{2}$; для полого цилиндра с внутренним радиусом R_1 и наружным R_2 , $\rho^2 = \frac{R_2^2 + R_1^2}{2}$. Значения радиусов инерции для тел наиболее типичной формы приведены в следующей таблице.

Значения радиусов инерции ρ тел различной формы

1. Прямоугольная призма вокруг оси, проходящей через центр	$\rho^2 = \frac{b^2 + c^2}{12}$	
2. Прямоугольная призма вокруг оси, проходящей через одну плоскость	$\rho^2 = \frac{4b^2 + c^2}{12}$	
3. Прямоугольная призма вокруг внешней оси	$\rho^2 = \frac{4b^2 + c^2 + 12bd + 12d^2}{12}$	
4. Цилиндр вокруг оси, проходящей через центр	$\rho^2 = \frac{l^2 + 3r^2}{12}$	
5. Цилиндр вокруг оси, проходящей через основание	$\rho^2 = \frac{4l^2 + 3r^2}{12}$	
6. Цилиндр вокруг внешней оси	$\rho^2 = \frac{4l^2 + 3r^2 + 12dl + 12d^2}{12}$	
7. Всякое тело вокруг оси, не проходящей через центр тяжести	$\rho^2 = R_0^2 + a^2.$	

R_0 — радиус инерции вокруг оси, проходящей через центр тяжести, ρ — радиус инерции вокруг другой параллельной оси, a — расстояние между центром тяжести и осью вращения

В отдельных случаях электропривода точное вычисление момента инерции вращающихся тел представляет трудности, поэтому оперируют с приближенными цифрами. Например, для маховика иногда берут момент инерции обода и прибавляют от 8 до 15% для учета маховых масс спиц. В случае червяка или геликоидальных колес момент инерции зубцов принимают в 40% от момента инерции полого цилиндра соответствующих размеров. Само колесо учитывается как полый цилиндр. К полученной величине добавляют 25% для учета спиц и втулки. Если для зубчатого колеса даются лишь вес и шаг, момент инерции определяется как 60% всего веса, сосредоточенного по окружности радиуса шага.

В теории электропривода обычно оперируют не с моментами инерции J , а с маховыми моментами, обозначаемыми GD^2 . Заменяя в (82) массу через вес G и ускорение силы тяжести g , а радиус инерции ρ через диаметр D , получим

$$J = m \cdot \rho^2 = \frac{G}{g} \cdot \frac{D^2}{4} = \frac{GD^2}{4g}. \quad (83)$$

Маховой момент GD^2 выражается в kgm^2 . Очевидно, что для приведенного махового момента идеальной системы существует соотношение, аналогичное таковому для моментов инерции

$$GD^2 = (GD^2)_d + (GD^2)_1 \cdot \frac{1}{k_1^2} + (GD^2)_2 \cdot \frac{1}{k_2^2} + \dots + (GD^2)_n \cdot \frac{1}{k_n^2}. \quad (80'')$$

Отметим, что в английской и американской технике и литературе принято характеризовать маховые массы не величиной GD^2 в kgm^2 , а величиной момента инерции $J = \frac{G}{g} \rho^2$, причем G выражается в фунтах (lb); ρ — радиус инерции в футах; g — ускорение силы тяжести в футах/мин² ($g = 32,2 \text{ fmin}^2$). Для перевода американских величин $\left(\frac{G}{g} \cdot \rho^2\right)$ в метрические может служить следующая формула:

$$GD^2 \text{ в } \text{kgm}^2 = 5,43 \left(\frac{G\rho^2}{g} \text{ в } \text{lb-f-min}^2 \right).$$

Заметим, что с введением в уравнение движения привода вместо момента инерции махового момента его обычно пишут в виде:

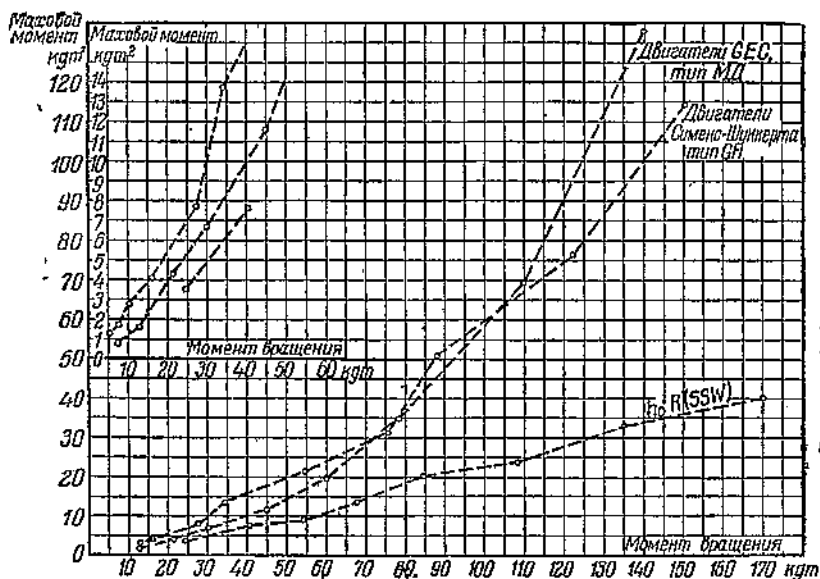
а) при постоянном GD^2

$$\pm M_d \pm M_m = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}; \quad (84)$$

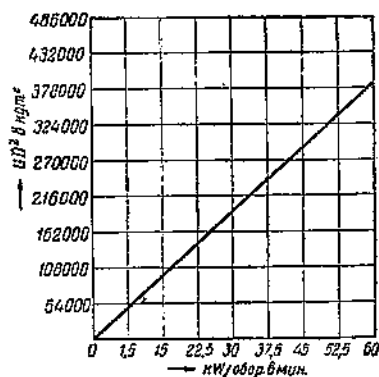
б) при переменном GD^2 согласно (63)

$$\begin{aligned} \pm M_d \pm M_m &= J(\alpha) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ(\alpha)}{d\alpha} \cdot \frac{\omega^2}{2} = \frac{GD^2(\alpha)}{375} \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{\pi^2 n^2}{7200 \cdot g} \cdot \frac{d[GD^2(\alpha)]}{d\alpha} \approx \\ &\approx \frac{GD^2(\alpha)}{375} \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{n^2}{7200} \cdot \frac{d[GD^2(\alpha)]}{d\alpha}. \end{aligned} \quad (85)$$

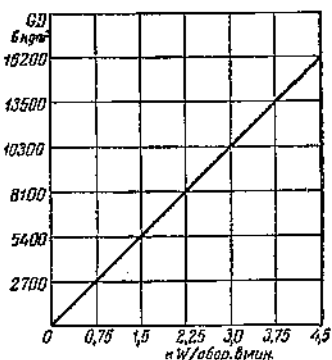
Значения маховых моментов различных кинематических связей системы могут быть подсчитаны согласно формуле (83) и табл. IV или по другим соответствующим формулам теоретической механики. Что же касается маховых моментов двигателей, то они приводятся в каталогах. Для примера на фиг. 52, 53, 54 и 55 приведены кривые маховых моментов некоторых двигателей.



Фиг. 52. Маховые моменты двигателей постоянного и переменного тока для металлургической промышленности.



Фиг. 53. Маховые моменты двигателей постоянного тока для шахтных подъемников.



Фиг. 54. Маховые моменты асинхронных двигателей для шахтных подъемников.

Заметим, что для крановых двигателей завода «Динамо» ориентировочно можно принимать:

1) для двигателей постоянного тока

$$GD^2 (\text{в } \text{kgm}^2) \approx \\ \approx 0,35 M_{Nd} (\text{в } \text{kgm});$$

2) для асинхронных двигателей

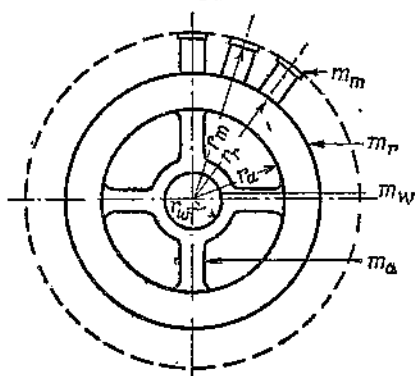
$$GD^2 (\text{в } \text{kgm}^2) \approx \\ \approx 0,25 M_{Nd} (\text{в } \text{kgm}).$$

Заметим также, что в ряде случаев (в особенности в старых каталогах) для электродвигателей дается лишь вес вращающихся частей, и их наружный радиус. В среднем можно принимать радиус инерции тихоходного двигателя в 75—85%

от наружного радиуса якоря или ротора, в 70—80% для двигателей средней скорости и в 60—65% для двигателей так называемого металлургического типа; в очень тихоходных двигателях большой мощности около 40%. Для двигателей, работающих при переменном режиме работы, знание махового момента является обязательным. Значения GD^2 двигателей должны обязательно приводиться в заводских каталогах.

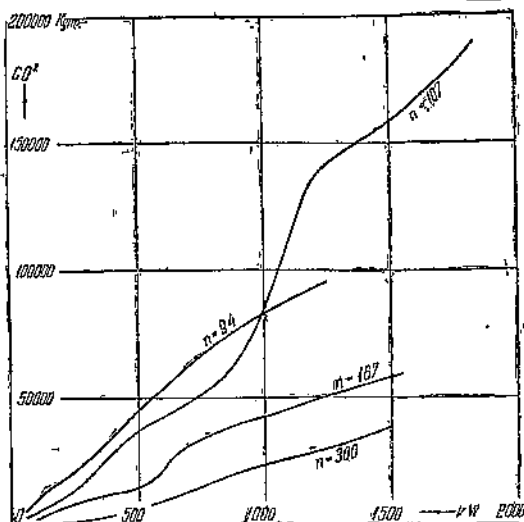
Если соответствующие данные отсутствуют и известны геометрические размеры двигателя, то вычисление момента инерции может быть сделано так, как показано на фиг. 56 для ротора синхронного двигателя.

Фиг. 56. Вычисление махового момента для ротора синхронного двигателя.



$$J = m_m \left(\frac{r_m + r_r}{2} \right)^2 + m_r \left(\frac{r_r + r_a}{2} \right)^2 + m_a \frac{r_a^2}{3} + m_w \frac{r_w^2}{2},$$

где m_m — масса полюсов; m_r — масса ядра; m_a — масса спиц; m_w — масса вала. Все массы выражены в $\text{kgm}^{-1}\text{sec}^2$.



Фиг. 55. Маховые моменты крупных асинхронных двигателей на 50 Гц.

23. Приведение поступательного движения к вращательному и обратно

В электроприводе нам весьма часто (кран, подъемник, строгальный станок) приходится сталкиваться с двумя видами движения: вращательным и поступательным. Уравнение поступательного движения, как известно, имеет вид:

$$F_d - F_m = m \cdot \frac{dv}{dt}, \quad (86)$$

где F_d — движущая сила; F_m — приведенная к скорости v сила статического сопротивления; m — приведенная к скорости v масса системы; $\frac{dv}{dt}$ — линейное ускорение.

Данное равенство может быть приведено к виду уравнения для вращательного движения. Если усилия F_d и F_m отнесены к окружности двигателя с ее радиусом, равным радиусу инерции ρ с линейной скоростью на этой окружности v , то, умножая (86) на ρ , получим

$$F_d \cdot \rho - F_m \cdot \rho = m \cdot \rho \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot \rho \cdot \frac{d(\rho \cdot \omega)}{dt} = m \cdot \rho^2 \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

так как $v = \rho\omega$. Заменяя $F_d \cdot \rho = M_d$ и $F_m \cdot \rho = M_m$ и $m\rho^2 = J$,

получим уравнение для вращательного движения.

Подобное сделанное нами приведение в простом виде возможно выполнить тогда, когда m будет представлять массу двигателя из всех движущихся в системе частей, отнесенную к линейной скорости одной из точек, находящихся на окружности радиуса инерции двигателя. Точно так же F_d и F_m должны быть усилиями двигателя и статическим усилием рабочей машины, отнесенным к какой-либо точке, которая расположена на окружности радиуса инерции двигателя.

Это основное положение и должно нами далее учитываться при приведении поступательных и вращательных движений.

Приведение вращательного движения к поступательному принципиально проделывается обратным порядком. При этом вращающие моменты заменяются усилиями F_d и F_m , отнесенными к скорости v главного кинематического звена исполнительного механизма. К этой же линейной скорости должна быть отнесена и масса m всей системы, заменяющая момент инерции при поступательном движении. Практически приведение делают обычно к линейной скорости перемещающегося поступательно основного рабочего звена исполнительного механизма. Так, в случае подъемного механизма это будет скорость подъемного троса (скорость на поверхности подъемного барабана), в случае строгального станка — линейная скорость стола и т. д.

Приведение усилий поступательного движения (F_m) к вращающим моментам (M_m) и обратно делается на основе равенства мощностей двух указанных видов движений. В случае передачи мощности от двигателя к рабочей машине

$$M_m \cdot \omega_d \cdot \eta_p = F_m \cdot v_m, \quad (87)$$

где η_p — к. п. д. промежуточных передач, откуда

$$M_m = \frac{F_m \cdot v_m}{\omega_d \cdot \eta_p} = \frac{F_m \cdot v_m \cdot 60}{2\pi n_d \cdot \eta_p} \quad (87')$$

Соответственно

$$F_m = \frac{M_m \cdot \omega_d \cdot \eta_p}{v_m} = \frac{M_m \cdot 2\pi n_d \cdot \eta_p}{60 v_m}. \quad (87'')$$

В том случае, когда мощность передается в направлении от механизма к двигателю (отрицательная нагрузка, торможение), знак к. п. д. в равенстве (87) переносится из левой части в правую.

При приведении маховых масс от поступательного движения к вращательному попрежнему будем исходить из равенства живых сил. Если мы имеем части, движущиеся вращательно с моментом инерции J и угловой скоростью ω_d , и части, движущиеся поступательно с массой m и линейной скоростью v (при скорости ω_d), то суммарная живая сила может быть выражена как

$$\frac{J_{прив} \cdot \omega_d^2}{2} = \frac{J \cdot \omega_d^2}{2} + \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (88)$$

или

$$\frac{m_{прив} \cdot v^2}{2} = \frac{J \cdot \omega_d^2}{2} + \frac{mv^2}{2}, \quad (88')$$

где v — линейная скорость массы m при угловой скорости двигателя ω .

При приведении к вращательному движению

$$J_{прив} = J + \frac{m v^2}{\omega_d^2} = J + J', \quad (89)$$

т. е. приведенная к вращательному движению масса эквивалентна моменту инерции

$$J' = \frac{m v^2}{\omega_d^2}.$$

При приведении к поступательному движению

$$m_{прив} = \frac{J \omega_d^2}{v^2} + m = m' + m, \quad (90)$$

т. е. приведенный к поступательному движению момент инерции эквивалентен массе

$$m' = \frac{J \omega_d^2}{v^2}.$$

В том случае, когда в системе будет n элементов вращающихся частей с моментами инерции J_1, J_2, \dots, J_n и соответственно с угловыми скоростями $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ и k элементов поступательно движущихся частей с массами m_1, m_2, \dots, m_k и соответственно с линейными скоростями v_1, v_2, \dots, v_k , то сначала делается приведение всех моментов инерции к одной оси по формуле (80). Далее все поступательно движущиеся массы приводятся к одной линейной скорости по равенству

$$m_{прив} = m_1 + m_2 \cdot \frac{v_2^2}{v_1^2} + m_3 \cdot \frac{v_3^2}{v_1^2} + \dots + m_k \cdot \frac{v_k^2}{v_1^2}. \quad (91)$$

Далее $J_{прив}$ и $m_{прив}$ приводятся к поступательному или вращательному движению по формулам (88) или (88'). Эти формулы относятся к случаю идеальной системы без потерь. Вопрос об учете потерь будет рассмотрен далее.

Заметим, что при приведении маховых масс должна быть максимальная тщательность.

Нужно брать моменты инерции обязательно при соответствующих им угловых скоростях так же, как брать массы обязательно при соответствующих им линейных скоростях.

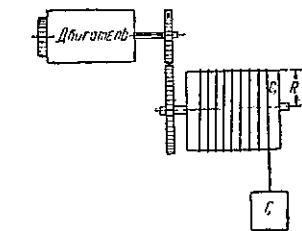
Отметим также, что в отдельных случаях рассмотрения динамики электропривода оказывается целесообразным оперировать при расчете не с радиусом инерции ρ , а наружным радиусом R той или другой механической части, например, барабана подъемника. При этом мы можем написать, что

$$J = m \cdot \rho^2 = m' \cdot R^2.$$

Очевидно, что величина m' представляет не истинную массу, а некоторую приведенную, т. е. отнесенную к какому-то определенному радиусу. При $R > \rho$ (так для направляющих шкивов шахтных подъемников $\rho \approx 0,7 R$) $m' < m$. Соответственно величина $G' = m' \cdot g$ дает не истинный вес рассматриваемой части, а вес, отнесенный также к радиусу R ,

$$\frac{m'}{m} = \frac{\rho^2}{R^2}; \quad \frac{G'}{G} = \frac{m'}{m} = \frac{\rho^2}{R^2}, \quad (92)$$

Иллюстрируем значение рассматриваемого вопроса на некоторых сравнительных выражениях для подъемного барабана фиг. 57. Пусть вес его будет G_1 , наружный радиус R , радиус инерции ρ , масса — m_1 .



Фиг. 57. Кинематическая схема подъемного барабана.

В таком случае $m_1 = \frac{G_1}{g}$.

Момент инерции барабана

$$J_1 = m_1 \cdot \rho^2 = m_x \cdot R^2,$$

где m_x — масса барабана, отнесенная к его наружному радиусу. Динамический момент на оси барабана за счет его маховых масс

$$M_J = J_1 \cdot \frac{d\omega_s}{dt}.$$

Динамическое усилие, соответствующее его маховым массам, отнесенное к окружности барабана

$$F_J = m_x \cdot \frac{dv}{dt}.$$

Таким образом, если мы хотим оперировать с окружной скоростью барабана, то мы должны оперировать с приведенной массой m_x . Если бы мы хотели оперировать с истинной массой m_1 , то получили бы динамическое усилие на окружности радиуса инерции.

В этом случае мы получили бы

$$F_{J1} = m_1 \cdot \frac{dv_1}{dt}.$$

Так как

$$v = R \cdot \omega_s, \text{ а } v_1 = \rho \omega_s \text{ и } v : v_1 = R : \rho,$$

то, стало быть,

$$F_{J1} = m_1 \cdot \frac{dv_1}{dt} = m_1 \cdot \frac{\rho}{R} \cdot \frac{dv}{dt}.$$

Динамические мощности, требуемые в обоих случаях, должны быть равны. Действительно,

$$\begin{aligned} F_J \cdot v &= m_x \cdot v \cdot \frac{dv}{dt} = m_1 \cdot \frac{\rho^3}{R^3} \cdot v_1 \cdot \frac{R}{\rho} \cdot \frac{dv}{dt} = m_1 \cdot \frac{\rho}{R} \cdot v_1 \cdot \frac{dv}{dt} = \\ &= m_1 \cdot \frac{\rho}{R} \cdot v_1 \cdot \frac{R}{\rho} \cdot \frac{dv_1}{dt} = F_{J1} \cdot v_1. \end{aligned}$$

Если в (89) вместо момента инерции ввести маховые моменты, то получим

$$\frac{GD^2}{4g} = \frac{(GD^2)_d}{4g} + \frac{mv^3}{\omega_s^2}, \quad (93)$$

откуда

$$\begin{aligned} GD^2 &= (GD^2)_d + \frac{mv^3 \cdot 4g}{\omega_s^2} = (GD^2)_d + \frac{G_1 \cdot v^2 \cdot 4g \cdot 30^3}{g \cdot \kappa^2 \cdot n^2} \approx \\ &\approx (GD^2)_d + \frac{364 G_1 v^2}{n^2}. \end{aligned} \quad (93')$$

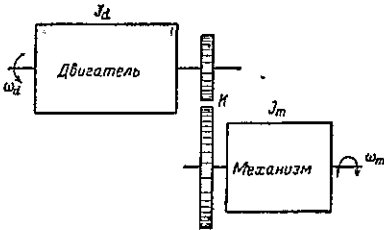
Пример приведения маховых масс для случая шактного подъемника рассмотрен далее.

24. Практические способы учета потерь в передачах при приведении динамических и статических моментов

Выше мы рассмотрели случаи приведения маховых масс в идеальной системе при передаче энергии без потерь в промежуточных звеньях. Однако при передаче живых сил имеют место потери энергии так же, как и при передаче статических мощностей. Эти потери зависят от к. п. д. передач и могут быть принци-

пиально учтены введением в выражения приведенных моментов инерции (или маховых моментов) соответствующих значений к. п. д.

Для упрощения вначале рассмотрим случай пуска в ход системы, представленной на фиг. 58, причем положим пока для упрощения, что промежуточные зубчатые звенья, вызывая потери энергии при передаче, сами по себе маховыми массами не обладают. В таком случае для ускорения системы нам требуются две составляющих динамического момента—одна составляющая для развертывания самого двигателя (M_{j1}) и другая составляющая для развертывания собственно рабочей машины (M'_{j2}).



Фиг. 58. Некоторая кинематическая схема электропривода.

Приведенный к валу двигателя динамический момент системы

$$M_j = J \cdot \frac{d\omega_d}{dt} = M_{j1} + M'_{j2}, \quad (94)$$

где J —приведенный момент инерции системы.

Первая составляющая

$$M_{j1} = J_d \cdot \frac{d\omega_d}{dt}.$$

Для получения второй составляющей мы должны иметь в виду, что на валу рабочей машины нам требуется динамический момент:

$$M_{j2} = J'_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt}.$$

Для покрытия момента M_{j2} на валу рабочей машины нам потребуется иной момент на валу двигателя как за счет иной скорости этого вала, так и за счет потерь в промежуточной передаче. Для приведения этого момента к валу двигателя мы должны воспользоваться теми же условиями, что и при приведении статического момента. Вся мощность, идущая на покрытие динамического момента на валу рабочей машины и на покрытие потерь в передаче этой динамической мощности, должна поступать с вала двигателя.

Следовательно как и в (76),

$$M'_{j2} \cdot \omega_d \cdot \eta_p = M_{j2} \cdot \omega_m. \quad (76'')$$

В этом равенстве к. п. д. $\eta_p = f(M_s + M_{j2})$ есть функция суммарного передаваемого через передачу статического и динамического момента. Он должен находиться

из кривой к. п. д. передачи по суммарному передаваемому моменту ($M_s + M_{j2}$).

В таком случае

$$M'_{j2} = M_{j2} \cdot \frac{\omega_m}{\omega_d} \cdot \frac{1}{\eta_p} \quad (95)$$

но

$$M_{j2} = J'_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \quad (96)$$

Подставляя равенства (96) в (95) и памятуя, что $\frac{\omega_d}{\omega_m} = k$, получаем

$$M'_{j2} = J'_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \cdot \frac{\omega_m}{\omega_d} \cdot \frac{1}{\eta_p} = J'_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{\omega_m}{\omega_d} \cdot \frac{1}{\eta_p} = J'_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt} \cdot \frac{1}{k^2} \cdot \frac{1}{\eta_p} \quad (97)$$

Подставляя (97) в (94), получаем

$$M_j = J_d \cdot \frac{d\omega_d}{dt} + J'_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt} \cdot \frac{1}{k^2} \cdot \frac{1}{\eta_p} = \left(J_d + J'_m \cdot \frac{1}{k^2} \cdot \frac{1}{\eta_p} \right) \cdot \frac{d\omega_d}{dt} \quad (98)$$

Сопоставляя выражение, стоящее в скобках равенства (98) с двумя первыми членами правой части равенства (80'), мы видим, что учет потерь в передачах от динамического момента рабочей машины вызвал при приведении маховых масс появление в приведенном маховом моменте к. п. д. передачи.

Очевидно, что при n элементах в системе «расчетный приведенный момент инерции» ее с учетом потерь в передачах в случае пуска при положительном статическом моменте будет

$$\left. \begin{aligned} J &= J_d + J_1 \cdot \frac{1}{k_1'^2} \cdot \frac{1}{\eta_{p1}} + J_2 \cdot \frac{1}{k_1'^2 \cdot k_2'^2} \cdot \frac{1}{\eta_{p1} \cdot \eta_{p2}} + \\ &+ J_3 \cdot \frac{1}{k_1'^2 \cdot k_2'^2 \cdot k_3'^2} \cdot \frac{1}{\eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \cdot \eta_{p3}} + \dots + J_n \cdot \frac{1}{k_1'^2 \cdot k_2'^2 \cdot \dots \cdot k_n'^2} \cdot \frac{1}{\eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \cdot \dots \cdot \eta_{pn}} \end{aligned} \right\} \quad (99)$$

где $\eta_{p1}, \eta_{p2}, \dots, \eta_{pn} = f(M'_s + M_{jx})$, а M_{jx} и M'_s представляют динамический и статический моменты, передаваемые через данную передачу.

Очевидно, что при постепенном переходе от двигателя к последнему звену рабочей машины динамические моменты, передаваемые через отдельные звенья, в рассматриваемом случае постепенно понижаются за счет уменьшения остающихся в последующих звеньях системы маховых масс

$$M_{jx} = J_x \cdot \frac{d\omega_d}{dt}$$

Для первого звена

$$J_{x1} = J_1 \cdot \frac{1}{k_1'^2} \cdot \frac{1}{\eta_{p1}} + J_2 \cdot \frac{1}{k_1'^2 k_2'^2} \cdot \frac{1}{\eta_{p1} \cdot \eta_{p2}} + \dots \\ \dots + J_n \cdot \frac{1}{k_1'^2 k_2'^2 \dots k_n'^2} \cdot \frac{1}{\eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \dots \eta_{pn}}.$$

Для k -го звена

$$J_{xk} = J_k \cdot \frac{1}{k_1'^2 \cdot k_2'^2 \dots k_k'^2} \cdot \frac{1}{\eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \dots \eta_{pk}} + \dots \\ \dots + J_n \cdot \frac{1}{k_1'^2 \cdot k_2'^2 \dots k_n'^2} \cdot \frac{1}{\eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \dots \eta_{pn}}.$$

Для n -го звена

$$J_{xn} = J_n \cdot \frac{1}{k_1'^2 \cdot k_2'^2 \dots k_n'^2} \cdot \frac{1}{\eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \dots \eta_{pn}}.$$

Аналогичное (99) выражение может быть написано также и для приведенных маховых моментов.

Введение нами в расчетное значение приведенного момента инерции (99) к. п. д. передач, не применяемое в теоретической механике, не может вызывать возражений по следующим причинам:

1) при введении в (99) к. п. д. размерность момента инерции, естественно, остается той же самой;

2) момент инерции является величиной геометрической лишь в случае одного жесткого тела (звена);

3) во всех случаях практики электрического привода и в различных кинематических схемах вообще приведенный момент инерции является лишь расчетным эквивалентом, т. е. расчетным значением J воображаемого диска, в котором запасается та же живая сила, что и в действительной кинематической схеме;

4) поскольку нас в практических задачах обычно интересует вычисление не действительной живой силы системы, а той энергии, которая должна быть передана двигателем маховым массам с учетом потерь, то такой учет соответствует физической сущности передачи живой силы.

На основании изложенного, мы считаем себя вправе именовать выражение (99) расчетным приведенным моментом инерции. В отличие от приведенного момента инерции без потерь мы расчетный приведенный момент инерции с учетом потерь будем далее обозначать через $J_{..}$.

Обычно такое простое по форме написание выражения для $J_{..}$, как в равенстве (99), возможно лишь для двух частных случаев — пуска электропривода в ход или ускорения электропривода при

уменьшении нагрузки при положительном статическом моменте, когда вся энергия, необходимая для накопления живых сил, передается от двигателя к органам рабочей машины и всем промежуточным звеньям. В других режимах картина условий передачи энергии может меняться. Так в случае ускорения электропривода без тока под влиянием отрицательного статического момента (спуск малого груза) вся кинетическая энергия во все звенья будет передаваться от последнего звена рабочей машины, т. е. груза. Очевидно, что в этом случае направление потока энергии будет обратное по сравнению с вышерассмотренным.

Изменение направления передачи энергии через промежуточные звенья меняет роль потерь при приведении как статических, так и динамических моментов. Этот вопрос был уже отмечен выше при рассмотрении приведения статических моментов. Так, при подъеме груза

$$M_{m \uparrow} = M_s \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\eta_p} \quad (77'')$$

При спуске же груза под влиянием его собственного веса

$$M_{m \downarrow} = M_s \cdot \frac{1}{k} \cdot \eta_p \quad (77''')$$

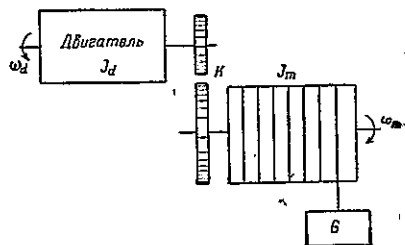
Покрытие потерь с другого конца кинематической схемы электрифицированного агрегата вызывает в выражении (77''') перенос к. п. д. из знаменателя (77') в числитель (77'''). Очевидно, что аналогичный перенос отдельных к. п. д. из знаменателя в числитель может иметь место и в равенстве (99) для других режимов работы.

Соответствующее правильное выражение для расчетного J_p с учетом потерь может быть написано лишь после анализа условий работы каждого звена в отдельности.

Для уяснения рассмотрим кинематическую схему подъемного механизма с одной зубчатой передачей (фиг. 59). Маховым моментом передачи мы для упрощения пренебрежем. Возьмем случай спуска малого груза при движущем моменте двигателя. Такой спуск носит название с и л о в о г о в отличие от спуска больших грузов, когда двигатель работает в т о р м о з н о м режиме.

Берем режим ускорения при пуске. Очевидно, что если

$$M_d < J_d \cdot \frac{d\omega_d}{dt} \quad \text{и} \quad M_m > J_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt},$$



Фиг. 59. Некоторая кинематическая схема электропривода подъемного механизма.

то энергия будет передаваться с вала рабочей машины (от груза) ж двигателю.

Если же

$$M_d > J_d \cdot \frac{d\omega_d}{dt} \quad \text{и} \quad M_m < J_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt},$$

то энергия будет передаваться с вала двигателя на вал рабочей машины. В написанных неравенствах все величины M_m , J_d , J_m отнесены к валу двигателя. Написание расчетного значения J_r даже для такой простой кинематической схемы представляет трудности.

В идеальной системе без потерь в передаче уравнение движения привода будет

$$M_d + M_m = \left(J_d + J_m \cdot \frac{1}{k^2} \right) \cdot \frac{d\omega_d}{dt}.$$

Если бы $M_m = 0$, то в системе с потерями

$$J'_r = J_d + J_m \cdot \frac{1}{k^2} \cdot \frac{1}{\eta'_{rp}},$$

где η'_{rp} соответствует $M'_j = J'_m \cdot \frac{1}{k^2} \cdot \frac{d\omega_d}{dt}$.

Если бы $M_d = 0$, то

$$J''_r = J_d \cdot \eta''_o + J_m \frac{1}{k^2},$$

где η''_o должен соответствовать $M''_j = J_d \cdot \frac{d\omega_d}{dt}$.

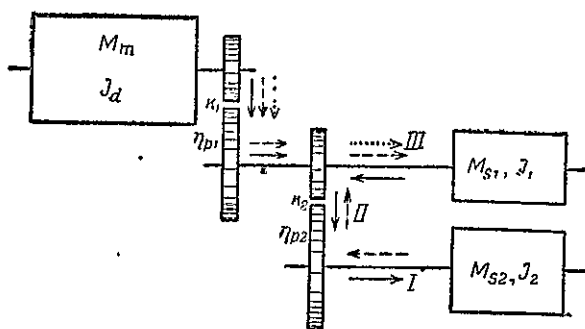
В первом из рассмотренных выше случаев (передача энергии с вала рабочей машины) передаваемый через передачу динамический момент будет меньше, чем $J'_r \cdot \frac{d\omega_d}{dt}$. Во втором случае (передача энергии с вала двигателя) передаваемый через передачу динамический момент будет меньше, чем $J''_m \cdot \frac{1}{k^2} \cdot \frac{1}{\eta'_{rp}} \cdot \frac{d\omega_d}{dt}$.

Нахождение значений передаваемых динамических моментов и соответствующих им величин к. п. д., а стало быть и расчетного значения J_r представляет, как видно, трудности даже при ординарной промежуточной передаче. При большем числе промежуточных звеньев вопрос усложняется еще более.

При самоторможении электропривода энергия может передаваться в промежуточные звенья, как от маховых масс рабочей машины, так и от маховых масс двигателя. Через отдельные звенья зубчатых передач в этом случае иногда энергия совсем не передается. Маховые массы двигателя могут покрывать потери на тре-

ние в нем самом и в близлежащих звеньях, в свою очередь маховые массы рабочей машины могут покрывать работу, обусловленную ее статическим моментом, и потери в близлежащих звеньях механических передач. Пояснение дает фиг. 60, где направление передачи энергии для трех разных случаев I, II и III показано стрелками.

При значительных маховых массах двигателя и малых маховых массах рабочей машины энергия и при самоторможении может передаваться от двигателя до последних звеньев исполнительного механизма. Принципиально при больших маховых массах ра-



Фиг. 60. Частный случай распределения энергии маховых масс при самоторможении электропривода.

бочей машины возможен и обратный случай, когда при самоторможении энергия маховых масс механизма, покрывая свой собственный статический момент, будет передаваться через все звенья вплоть до двигателя и покрывать в нем частично потери на трение.

Аналогичные условия могут быть и при электрическом торможении, когда двигатель создает тормозной момент. При отрицательном статическом моменте и работе двигателя без тока—при ускорении (спуск некоторого груза), вся энергия передается от груза к двигателю. При спуске малых грузов, когда груз не в состоянии сам преодолеть потери в системе, двигатель также иногда должен создавать движущий момент, и энергия маховым массам может передаваться как двигателем, так и за счет отрицательного статического момента. При большом грузе и тормозном моменте двигателя энергия при пуске опять-таки передается от рабочей машины к двигателю. Анализ вопроса в этом направлении имеет значение также и для расчета самих передач.

Очевидно, что потери в редукторах имеют место и при передаче энергии от вращательно движущихся частей к поступательно движущимся и обратно. Поэтому принципиально и при подобном приведении необходимо было бы также вводить соответствующий

к. п. д. редукторов. Так, равенство (89) для случая пуска следовало бы писать

$$J_r = J + \frac{mv^2}{\omega_d^2} \cdot \frac{1}{\eta_p},$$

где η_p — соответствующее значение к. п. д.

Из изложенного видно, что определение расчетного приведенного момента инерции J_r для многих случаев практики электропривода представляет большую сложность, так как:

1) к. п. д. передач является функцией суммарного передаваемого через звено момента $M_r = M'_m + M_{jx}$;

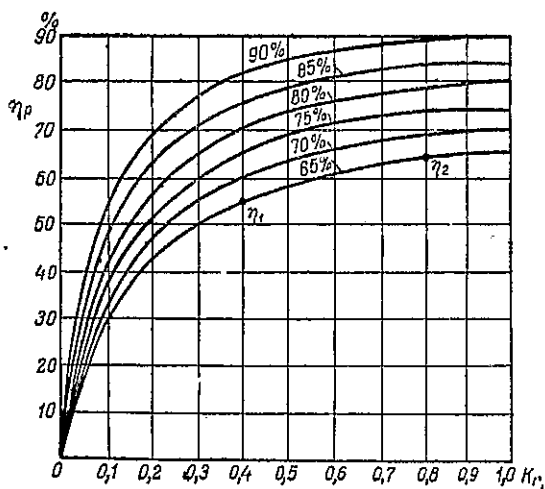
2) закон изменения к. п. д. передач во многих случаях практики привода просто неизвестен;

3) определение моментов, передаваемых через отдельные звенья, в сложных кинематических схемах представляет большую сложность;

4) величина динамических моментов, обычно непрерывно меняющихся, для многих случаев может быть найдена лишь после

решения уравнения движения привода, для которого при учете потерь уже требуется знание динамических моментов.

Поэтому в практике электропривода для упрощения расчета часто принято при приведении динамических моментов к. п. д. передач не учитывать. При этом в целях учета потерь от передачи живых сил в формулу (76') для приведенного статического момента вводят несколько преуменьшенное значение к. п. д. η_{11} , соответ-



Фиг. 61. Типичные кривые к. п. д. зубчатых передач.

ствующее M_m , а не η_2 , соответствующее передаваемому моменту ($M_m + M_j$). На фиг. 61 представлен характер кривой к. п. д. типичных зубчатых передач, в зависимости от загрузки $k = M/M_N$ для разных нормальных значений к. п. д. Из него видно, что $\eta_1 < \eta_2$. Тем самым вносится некоторый корректив на недоучет потерь при передаче живых сил и упрощается подсчет приведенного статического момента.

Опыт показывает, что подобный способ расчета дает более или менее правильные результаты, а для решения практических задач

оказывается много проще. К тому же нужно добавить, что законы изменения к. п. д. передач к настоящему времени изучены весьма мало. Исследование потерь в механических передачах стоит в порядке дня.

В последние годы в связи с необходимостью получения наибольшей производительности исполнительных механизмов, в особенности при непрерывном поточном производстве, охватываемом схемами комплексной автоматизации, потребовалось уточнение расчета времен пуска, торможения и вообще переходных режимов электроприводов. В связи с этим в практику привода стали вводить другой способ учета потерь в передачах (Казанцев Л. 45, Ниман Л. 46, Пресс Л. 47).

Потери в зубчатых передачах складываются практически из потерь постоянных и потерь переменных, зависящих от нагрузки. Эти потери могут быть выражены через момент потерь M_p . Этот последний момент для каждой передачи складывается из постоянного момента M_{pc} , не зависящего от нагрузки, и переменного момента M_{pv} , пропорционального моменту нагрузки ($M'_m + M'_j$):

$$M_{pv} = b (M'_m + M'_j),$$

где b — величина постоянная. Соответственно

$$M_p = M_{pc} + M_{pv} = a \cdot M_{Np} + b(M'_m + M'_j), \quad (100)$$

где M_{Np} — нормальный расчетный момент передачи.

В таком случае при одной передаче между двигателем и исполнительным механизмом уравнение движения электропривода для случая пуска получит вид

$$\left. \begin{aligned} M_d - M_s \cdot \frac{1}{k} - M_{pc} - M_{pv} = \\ = M_d - M_s \cdot \frac{1}{k} - a \cdot M_{Np} - b(M'_s + M'_j) = J \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (101)$$

В этом равенстве к. п. д. не фигурирует ни при приведении статического момента M_s , ни при приведении момента инерции J , а потери учитываются моментами потерь M_{pc} и M_{pv} . При большем числе передач уравнение усложняется еще более в силу двух причин: 1) значения a и b в общем случае для разных передач неодинаковы; каждая передача в уравнении движения привода должна учитываться двумя добавочными членами M_{pcx} и M_{pvx} ; 2) через каждую передачу передается свое значение M'_s и M'_j . Поэтому практически к подобным расчетам с введением в уравнение движения моментов потерь передач можно прибегать лишь в сравнительно редких случаях тем более, что, как уже отмечалось, значения коэффициентов a и b передач, так же как и кривые их к. п. д., к настоящему времени в достаточной мере не изучены.

Исследования, производившиеся различными авторами, показывают, что в различных типах зубчатых передач соотношение между постоянными и переменными потерями колеблется в широких пределах. Так, по данным Нимана, для крановых подъёмных установок отношение $\frac{a}{a+b}$ колеблется от 0,364 до 0,66. В металлорежущих станках за счет усложненной кинематики этих механизмов это соотношение для станка в целом лежит обычно выше. По данным Крелля, для каждой пары зубчатых передач крановых лебедок в качестве средних значений можно принимать $a=0,02$ при подшипниках скользящего трения; при роликовых и шариковых подшипниках $a=0,03-0,04$, $b=0,03-0,04$.

Проф. Прессом [Л. 47] дана методика учета потерь в передачах подъемно-транспортных механизмов при условии принятия равенства коэффициентов a и b для всех пар передач, а также при некоторых других допущениях. Принятые в этой методике условия не обеспечивают полной точности подсчетов. Однако сделанные по ней расчеты показывают, какова может быть неточность в указанных установках при применяемых ныне методах расчета.

Наиболее удобное решение задачи при учете потерь в передачах моментами потерь предложено И. Н. Казанцевым [Л. 45]. Основы его приводятся ниже.

Введем понятие удельного вращающего момента переменных потерь

$$\beta = \frac{M_{Npv}}{M_{Nm}}, \quad (102)$$

где M_{Nm} — номинальный статический момент, отнесенный к скорости двигателя, а M_{Npv} — момент переменных потерь в передаче при номинальной нагрузке (номинальном статическом моменте). Очевидно, что при другой нагрузке M_x

$$M_{xpv} = M_{Npv} \cdot \frac{M_x}{M_{Nm}} = \beta \cdot M_x.$$

В этом случае уравнение движения привода для случая пуска в соответствии с (101) можно написать

$$M_d = M_m + (J_a \cdot \delta + J_m) \cdot \frac{d\omega_d}{dt} + M_{pc} + M_{Npv} \cdot \frac{M_m + J_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt}}{M_{Nm}}. \quad (103)$$

В этом равенстве J_a — момент инерции двигателя; δ — коэффициент, учитывающий маховые массы передач; J_m — приведенный к валу двигателя момент инерции исполнительного механизма. Равенство (103) можно переписать в виде

$$M_d = M_m + (J_a \cdot \delta + J_m) \cdot \frac{d\omega_d}{dt} + M_{pc} + \beta \left(M_m + J_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt} \right)$$

или

$$M_d - [M_m(1 + \beta) + M_{pc}] = [J_d \cdot \delta + J_m(1 + \beta)] \frac{d\omega_d}{dt} \quad (104)$$

Оба стоящие в квадратных скобках выражения являются величинами постоянными. Обозначим выражение в квадратных скобках в левой части через постоянную величину M'_m , а выражение в квадратных скобках правой части через J'_r . Очевидно, что M'_m представляет некоторый новый статический момент, а J'_r — некоторый новый расчетный момент инерции, приведенный к валу двигателя.

В таком случае равенство (104) получает вид (105)

$$M_d - M'_m = J'_r \frac{d\omega_d}{dt} \quad (105)$$

т. е. совершенно нормальный для уравнения движения электропривода. В нем влияние постоянных потерь в передачах отражается моментом M_{pc} , а переменных потерь коэффициентом β . Выражение (105) может быть использовано для уточненных расчетов без особых затруднений.

Совершенно аналогичный хотя и отличный вид получит уравнение движения электропривода при торможении, когда двигатель создает тормозной момент.

В этом случае

$$- \left[M_d + M_m + M_{pc} + M_{Npv} \cdot \frac{J_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt} - M_m}{M_{Nm}} \right] = (J_d \cdot \delta + J_m) \cdot \frac{d\omega_d}{dt} \quad (106)$$

При этом динамический момент покрывает тормозной момент двигателя M_d , статический момент M_m и моменты потерь в передачах. Так как статический момент механизма покрывается непосредственно с его вала, передаваемый через передачу момент будет равен их разности $(J_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt} - M_m)$. Этому моменту и пропорциональны переменные потери в передаче.

Вводя в (106) значение β , получим

$$- [M_d + M_m(1 - \beta) + M_{pc}] = [J_d \cdot \delta + J_m(1 - \beta)] \frac{d\omega_d}{dt} \quad (107)$$

или

$$- [M_d + M'_m] = J'_r \frac{d\omega_d}{dt} \quad (105')$$

Отдача энергии через передачи в обратном направлении сказалась в (105') по сравнению с (105) в изменении знаков перед β . Очевидно, что это изменение равносильно перестановкам к. п. д. из числителя в знаменатель в равенствах (77') и (77'').

Рассмотрим еще один случай отрицательного статического момента при движущем моменте двигателя. Положим, что один

груз при спуске не может преодолеть потерь в системе и мы имеем, как говорят, силовой спуск, а не тормозной, когда машина работает тормозом. Как мы отмечали несколько выше, в этом случае возможны два варианта передачи энергии:

1) энергия передается с вала рабочей машины на вал двигателя. Так как при этом через передачу передается момент

$$J_d \cdot \delta \cdot \frac{d\omega_d}{dt} - M_d,$$

то уравнение привода будет иметь вид

$$M_d + M_m = J_d \cdot \delta \cdot \frac{d\omega_d}{dt} + J_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt} + M_{pc} + \beta \left(J_d \cdot \delta \cdot \frac{d\omega_d}{dt} - M_d \right),$$

откуда после преобразований получим

$$M_d(1 + \beta) + M_m - M_{pc} = [J_m + J_d \cdot \delta(1 + \beta)] \cdot \frac{d\omega_d}{dt} \quad (108)$$

или

$$M_d(1 + \beta) + M_m''' = J_r''' \cdot \frac{d\omega_d}{dt}; \quad (108'')$$

2) энергия передается с вала двигателя на вал рабочей машины. В этом случае через передачу передается полезный момент

$$J_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt} - M_m.$$

Уравнение движений привода получает вид

$$M_d + M_m = (J_d \cdot \delta + J_m) \frac{d\omega_d}{dt} + M_{pc} + \beta \left(J_m \cdot \frac{d\omega_d}{dt} - M_m \right)$$

или

$$M_d + M_m(1 + \beta) - M_{pc} = [J_m \cdot (1 + \beta) + J_d \cdot \delta] \cdot \frac{d\omega_d}{dt} \quad (109)$$

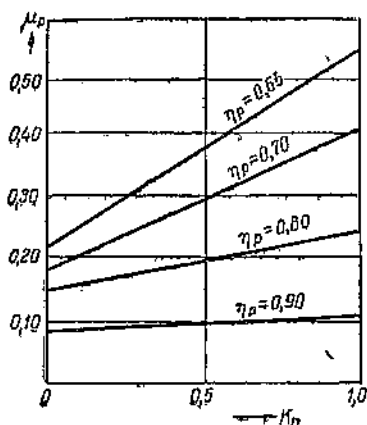
или

$$M_d + M_m''' = J_r''' \cdot \frac{d\omega_d}{dt}. \quad (109''')$$

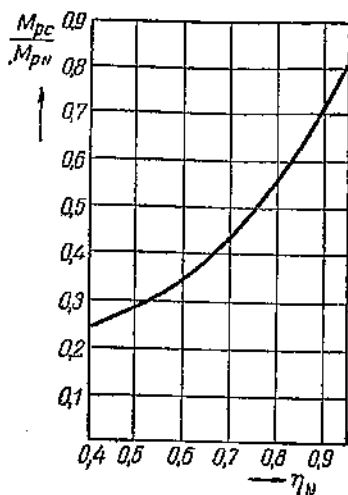
По аналогии могут быть написаны условия и для других различных условий.

Используя ряд различных источников, Казанцев получил кривые фиг. 62, 63 и 64, где даны значения моментов потерь для разных номинальных значений к. п. д. передач.

Приведенный выше расчет проведен применительно к однозвеньеовой передаче с двумя шестернями. На практике приходится часто иметь дело с многозвеньеовыми передачами. При этом для



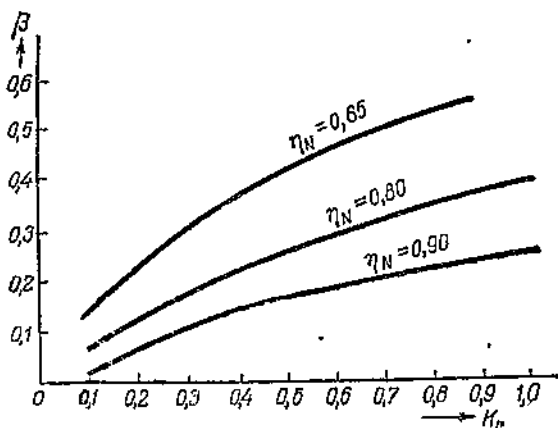
Фиг. 62. Кривые момента полных потерь зубчатых передач в зависимости от коэффициента загрузки $k_r = \frac{M_{рх}}{M_{рн}}$ для разных номинальных к. п. д. передач.



Фиг. 63. Кривые отношения постоянных потерь к полным потерям $\frac{M_{рс}}{M_{рн}}$ в зависимости от величины номинального к. п. д. η_n .

получения точных результатов необходимо учитывать в уравнениях (104), (107), (108) и (109) потери каждого звена в отдельности. Это обстоятельство исключительно усложняет все расчеты, что затрудняет практическое применение приведенного метода. Замена же

многозвневой передачи однозвневой с результирующим к. п. д. при номинальной нагрузке всегда будет давать менее точные результаты, преувеличивающие потери в передачах. Поэтому такая замена никаких преимуществ перед применяющимся обычно методом учета потерь лишь при приведении статического момента не имеет.



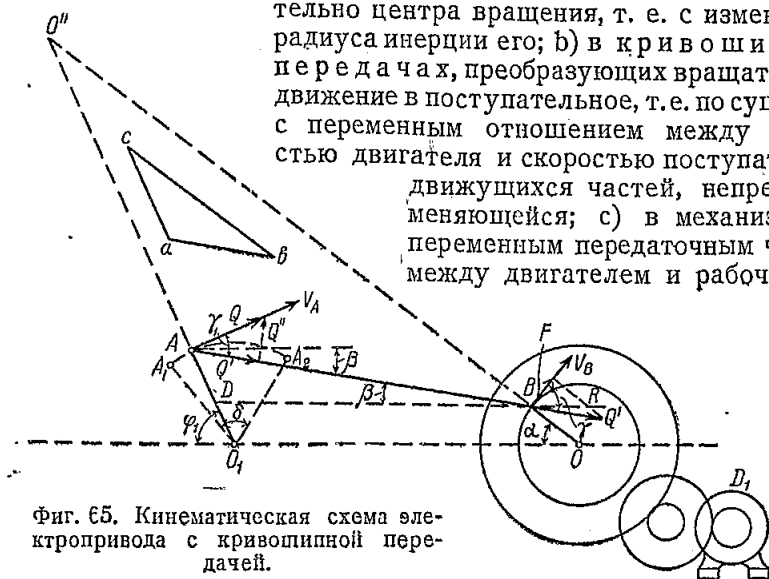
Фиг. 64. Зависимость β отношения переменных потерь к полным потерям от коэффициента загрузки для разных номинальных значений к. п. д. передач.

25. Определение приведенных усилий и приведенных маховых моментов в механизмах с кривошипной передачей

Выше (п. 20) нами было указано, что в случае переменного момента инерции $J = f(\alpha)$ уравнение движения электропривода получает более общий вид

$$M_d - M_m = J(\alpha) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ(\alpha)}{d\alpha} \cdot \frac{\omega^2}{2}. \quad (63')$$

Подобное изменение момента инерции имеет место по существу в трех типичных случаях; связанных с наличием поступательного движения: а) в кинематических схемах, обуславливающих перемещение центра тяжести какого-либо тела относительно центра вращения, т. е. с изменением радиуса инерции его; б) в кривошипных передачах, преобразующих вращательное движение в поступательное, т. е. по существу с переменным отношением между скоростью двигателя и скоростью поступательно движущихся частей, непрерывно меняющейся; в) в механизмах с переменным передаточным числом между двигателем и рабочей ма-



Фиг. 65. Кинематическая схема электропривода с кривошипной передачей.

шиной. Это имеет место, например, в периоды разгона и торможения в приводе с гидравлическими и частично электромагнитными муфтами.

В качестве примера возьмем кинематическую схему с кривошипной передачей, представленной на фиг. 65. Подобная передача весьма часто используется в различных вспомогательных механизмах металлургических заводов (подъемных качающихся столов, кантователях, ножницах и др.).

В рассматриваемой схеме за один цикл работы кривошип OB , приводимый через зубчатые передачи двигателем D_1 , делает один полный оборот на 360° . При этом через шатун AB движение передается рычагу AO_1 . Последний за один цикл будет качаться в пределах угла δ , т. е. точка A будет перемещаться от точки A_1 к точке A_2 и обратно.

Определим сначала закон изменения статического момента, приведенного к валу двигателя. Рычаг OA должен преодолеть усилие Q , приложенное к точке A по касательной. Вследствие непрерывного изменения соотношения скоростей точек A и B в рассматриваемой системе при неизменном значении Q величина приведенного к валу двигателя статического момента будет непрерывно меняться.

Обозначим силу, приложенную в точке B кривошипа по касательной, через F . В таком случае, исходя из равенства мощностей, развиваемой двигателем и передаваемой рычагом O_1A , и при пренебрежении потерями на трение в шатунно-кривошипной системе, можно написать

$$Q \cdot v_A = F \cdot v_B,$$

где v_A и v_B — соответственно линейные скорости точек A и B . При учете потерь на трение в механизме некоторым к. п. д. η_t

$$Q \cdot v_A = F \cdot v_B \cdot \eta_t.$$

Соотношение скоростей v_A и v_B может быть найдено в зависимости от расстояний точек A и B от мгновенного центра O'' . Мгновенный центр вращения рассматриваемой системы, т. е. мгновенный центр вращения шатуна AB относительно неподвижного кинематического звена OO_1 лежит в точке O'' пересечения направлений O_1A и OB . Если ω будет мгновенная угловая скорость вращения системы, то

$$v_A = \omega \cdot AO'', \quad v_B = \omega \cdot BO''.$$

Длины AO'' и BO'' могут быть найдены из фиг. 65. Если, как это часто бывает, точка O'' лежит за пределами чертежа, то соотношение между AO'' и BO'' может быть найдено из диаграммы скоростей. Для построения последней нужно провести параллельно шатуну прямую $a'b'$ и через две любых точки этой прямой провести отрезки ac и bc , первый параллельно O_1A , второй параллельно OB . В таком случае

$$\frac{AO''}{BO''} = \frac{ac}{bc} = \frac{v_A}{v_B}.$$

Следовательно,

$$F = Q \cdot \frac{ac}{bc}.$$

Для нахождения силы F разложим сначала силу Q на две силы: Q' , направленную по шатуну и Q'' , ей перпендикулярную. В таком случае $Q' = Q \cdot \cos \gamma_1$.

Так как

$$\angle BAD = 180^\circ - \beta - (180^\circ - \varphi_1) = \varphi_1 - \beta,$$

Но

$$\gamma_1 = 90^\circ - (\varphi_1 - \beta);$$

следовательно,

$$Q' = Q \cdot \sin(\varphi - \beta).$$

Перенесем далее силу Q' к точке B кривошипа и разложим ее на касательную силу F и перпендикулярную ей силу R . Эта последняя уравновешивается реакцией опоры. Из фиг 65 видно, что

$$F = Q' \cdot \cos \gamma = Q' \cdot \sin(\alpha - \beta),$$

Следовательно,

$$F = Q \cdot \sin(\varphi_1 - \beta) \cdot \sin(\alpha - \beta)$$

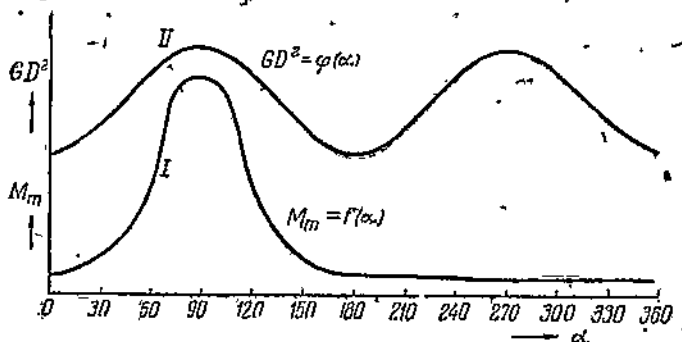
и

$$\frac{ac}{bc} = \sin(\varphi_1 - \beta) \cdot \sin(\alpha - \beta),$$

Приведенный к валу двигателя статический момент механизма будет

$$M_m = F \cdot r \cdot \frac{1}{k \cdot \eta_p} = \frac{Q \cdot \sin(\varphi_1 - \beta) \sin(\alpha - \beta) \cdot r}{k \cdot \eta_p}, \quad (110)$$

где r — радиус кривошипа, k — передаточное число между двигателем и кривошипом, а η_p — к. п. д. соответствующих передач.



Фиг. 66. Закон изменения приведенного статического и приведенного махового момента в случае ножниц с кривошипной передачей.

Закон изменения статического момента в зависимости от угла поворота кривошипа α в случае ножниц с кривошипной передачей представлен кривой I на фиг. 66. Участок большего значения момента соответствует периоду резания металла с $Q = \text{const}$. Отметим, что в случаях, когда длина шатуна превышает длину кривошипа более чем в семь раз, можно считать, что шатун имеет все время горизонтальное положение. В этом случае рычаг $O'A$

можно мыслить вертикальным и силу Q переносить к точке B прямо по горизонтали. Это обстоятельство иллюстрирует фиг. 67. Практически можно принять $\varphi_1 \approx 90^\circ$ и $\beta = 0$. В таком случае получим колебание рычага относительно своего вертикального положения. При этом

$$F = Q \cdot \sin \alpha. \quad (111)$$

Переходим к определению закона изменения приведенного махового момента. Найдем сначала вес частей, движущихся посту-

пательно, отнеся его к точке B . Пусть масса поступательно движущихся частей, отнесенная к точке A , будет m_A , а отнесенная к точке B будет m_B . Следовательно (из равенства живых сил),

$$m_A \cdot \frac{v_A^2}{2} = m_B \cdot \frac{v_B^2}{2},$$

$$m_B = m_A \cdot \frac{v_A^2}{v_B^2} = m_A \left(\frac{ac}{bc} \right)^2 = m_A \cdot \sin^2(\varphi_1 - \beta) \cdot \sin^2(\alpha - \beta).$$

Момент инерции J_x этих частей, отнесенный к угловой скорости кривошипа ω_k , будет

$$\frac{J_x \omega_k^2}{2} = \frac{(GD^2)_x \cdot \omega_k^2}{2} = \frac{m_A \cdot \sin^2(\varphi_1 - \beta) \cdot \sin^2(\alpha - \beta) \cdot v_A^2}{2}.$$

Так как $v_A = \omega_k \cdot r$, то

$$(GD^2)_x = m_A \cdot g \cdot 4r^2 \cdot \sin^2(\varphi_1 - \beta) \cdot \sin^2(\alpha - \beta).$$

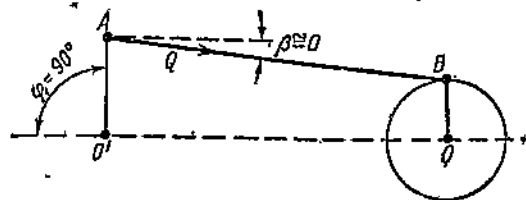
Суммарный приведенный маховой момент системы, отнесенный к валу двигателя

$$GD^2 = (GD^2)_d + \frac{m_A \cdot g \cdot 4r^2 \cdot \sin^2(\varphi_1 - \beta) \cdot \sin^2(\alpha - \beta)}{k^2}. \quad (112)$$

Таким образом приведенный маховой момент системы состоит из постоянного махового момента—двигателя с зубчатыми передачами и переменного—соответствующего частям, которые совершают колебательное движение. Закон изменения махового момента представлен на фиг. 66 кривой II.

Если мы здесь сделаем то же допущение, что и для равенства (111), то получим

$$GD^2 = (GD^2)_d + \frac{m_A \cdot g \cdot 4r^2 \cdot \sin^2 \alpha}{k^2}. \quad (113)$$



Фиг. 67. Перенос сил при большой длине шатуна ножниц.

Для рассматриваемых случаев уравнение движения привода в случае пуска получит вид [в соответствии с равенством (63')]:

$$M_d = \frac{Q \cdot \sin(\varphi_1 - \beta) \cdot \sin(\alpha - \beta) \cdot r}{k \cdot \eta} = \frac{(GD^2) \text{const}}{375} \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{d(GD^2) \text{var}}{d\alpha} \cdot \frac{1}{4g} \cdot \frac{\omega^2}{2}$$

Сложность анализа указанного уравнения побуждает обычно рассматривать его решение по участкам, причем для каждого участка значение J_x принимается постоянным. Это постоянное значение может быть принято средним в пределах изменения угла от α_1 до α_2 .

Это среднее значение J_x может быть найдено следующим образом. Если в начале участка момент инерции будет J_1 и скорость ω_1 , а в конце участка соответственно J_2 и ω_2 , то приращение живой силы на участке будет

$$\Delta A = \frac{J_2 \omega_2^2 - J_1 \omega_1^2}{2} = \frac{(J_1 + \Delta J) \omega_2^2 - J_1 \omega_1^2}{2} = \frac{J_1 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2} + \frac{\Delta J \cdot \omega_2^2}{2} = \Delta A_1 + \Delta A_2. \quad (114)$$

Очевидно, что ΔA_1 означает приращение живой силы для той части момента инерции J_1 , которая остается постоянной. Добавочная часть момента инерции ΔJ должна получить приращение живой силы, соответствующее приращению скорости от 0 до ω_2 . Член ΔA_2 может быть представлен в виде

$$\Delta A_2 = \frac{\Delta J \cdot \omega_2^2}{2} = \frac{\Delta N (\omega_2 - 0)}{2}.$$

Эта часть и соответствует добавочному второму члену в уравнении движения привода, в дифференциальной форме равному

$$\frac{dJ(\alpha)}{d\alpha} \cdot \frac{\omega^2}{2}.$$

Очевидно, что эквивалентное среднее значение момента инерции для рассмотренного участка будет

$$J_x = \frac{J_2 \omega_2^2 - J_1 \omega_1^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}. \quad (115)$$

Если, прибегая в рассматриваемом случае к решению уравнения движения привода по участкам, мы будем в это уравнение подставлять вместо приведенного момента инерции значение J_x , вычисленное по формуле (115), то уравнение движения примет обычную форму

$$M_d - M_m = J_x \cdot \frac{d\omega_d}{dt},$$

и четвертый член уравнения (63') должен быть опущен.

При этом получается вообще точность, достаточная для практических целей. Примерное решение для аналогичного случая будет дано в последующем.

26. Время пуска и торможения электропривода и пройденный за это время органами рабочей машины путь

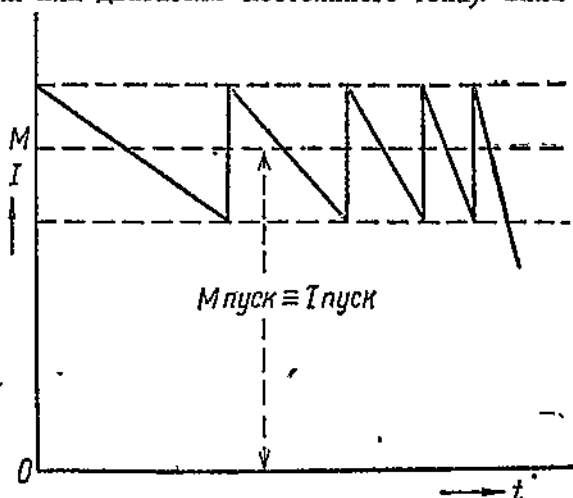
Уравнение движения электропривода дает возможность определить время пуска и торможения двигателя. Длительность времен пуска и торможения имеет существенное значение с точки зрения производительности исполнительных механизмов. Вместе с тем эти времена не могут быть меньше некоторого минимума, определяемого допустимыми механическими усилиями в системе (с точки зрения ее прочности).

Рассмотрим сначала пуск двигателя вхолостую. Уравнение движения в этом случае получит вид

$$M_d = \frac{(GD^2)_d}{375} \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (116)$$

Примем случай пуска двигателя под пусковым реостатом (асинхронного с кольцами или двигателя постоянного тока). Сила

тока, а стало быть, и вращающий момент двигателя ($M = c \cdot I \cdot \Phi$ и при $\Phi = \text{const}$, $M = k_1 \cdot I$) в зависимости от скорости будут изменяться по кривым фиг. 68. Толчки тока соответствуют переключениям ступеней реостата. При правильном расчете пусковых сопротивлений и своевременном переключении их, что вполне достигается при автоматическом управлении, толчки тока — отдельные максимумы и минимумы в кривой тока — будут



Фиг. 68. Изменение силы тока в двигателе при пуске.

одинаковыми. Примем для приближенного подсчета (практически получаемая точность будет порядка 10%), что во все время пуска сила тока двигателя I_a , а стало быть, и развиваемый им момент M_d остаются постоянными. Положим, что среднее значение тока $I_{ам} = \alpha \cdot I_N$ и среднее значение момента $M_{ам} = \alpha \cdot M_N$, где α обычно лежит в пределах 1,5 — 1,6. В таком случае при постоянном вращающем

момента угловое ускорение двигателя $\left(\frac{d\omega_d}{dt}\right)$, а стало быть, и величина $\frac{dn_d}{dt}$ остаются постоянными. Очевидно, величина $\frac{dn_d}{dt}$ может быть заменена величиной $\frac{n'_0}{t_{p0}}$, где n'_0 — число оборотов холостого хода, а t_{p0} — время пуска вхолостую. Равенство (116) превращается из дифференциального в алгебраическое и время пуска двигателя вхолостую равно

$$t_{p0} = \frac{(GD^2)_d \cdot n'_0}{375 \cdot M_N \cdot \alpha} \quad (117)$$

Аналогичное равенство получается в рассматриваемых условиях и при постоянном статическом моменте M_m . Время пуска в этом случае

$$t_p = \frac{GD^2 \cdot n_s}{375(M_N \cdot \alpha - M_m)} \quad (118)$$

В равенстве (118) GD^2 представляет уже приведенный к валу двигателя маховой момент всей системы; n_s — число оборотов двигателя в минуту при $M_d = M_m$ при отсутствии добавочного сопротивления в цепи двигателя.

В общем случае, когда M_d не остается постоянным и когда M_m непостоянен, время пуска может быть определено лишь в результате интегрирования уравнения движения электропривода

$$t_p = \int_0^{n_s} \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{M_d - M_m} = \frac{GD^2}{375} \int_0^{n_s} \frac{dn}{M_d - M_m} \quad (119)$$

В случае торможения электропривода и потенциального статического момента

$$t_p = \frac{GD^2}{375} \int_{n_s}^0 \frac{dn}{(-M_d - M_m)} = \frac{GD^2}{375} \int_0^{n_s} \frac{dn}{M_d + M_m}$$

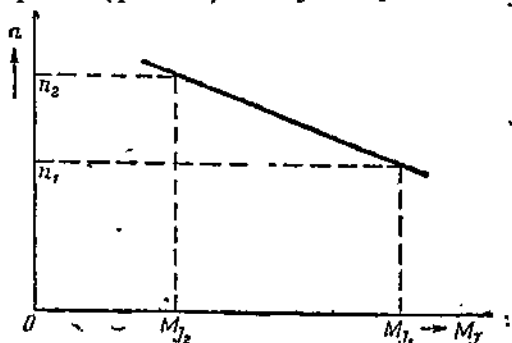
Таким образом в общем случае время пуска и торможения для разных условий выражается обобщенным равенством

$$t_p = \frac{GD^2}{375} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{\pm M_d \pm M_m} \quad (120)$$

Совершенно аналогичным образом выражается время переходных режимов при переходе от одной нагрузки или одной скорости к другой. Решение уравнения движения привода для различных случаев будет рассмотрено далее в отделе переходных режимов и нагрузочных диаграмм.

Здесь мы рассмотрим лишь один простой способ определения времени пуска (или торможения), довольно часто используемый на практике и соответствующий прямолинейному изменению динамического момента от скорости (фиг. 69). В случае криволинейной зависимости $M_j = f(n)$ может быть разбита на ряд участков, на каждом из которых закономерность может быть принята прямолинейной. Таким образом этот случай может считаться общим.

Имея прямолинейную зависимость M_j между соответствующими скоростями n_1 и n_2 со значениями M_j в этих точках M_{j1} и M_{j2} , мы можем для M_j написать для рассматриваемого участка равенство



Фиг. 69. Прямолинейная зависимость динамического момента от скорости.

$$M_j = M_{j1} + \frac{M_{j2} - M_{j1}}{n_2 - n_1} (n - n_1),$$

откуда

$$M_j = M_{j1} + \frac{M_{j1} - M_{j2}}{n_2 - n_1} n_1 - \frac{M_{j1} - M_{j2}}{n_2 - n_1} \cdot n.$$

В правой части два первых члена представляют величину постоянную. Обозначим ее через α . Соответственно обозначим через β величину $\frac{M_{j1} - M_{j2}}{n_2 - n_1}$.

В таком случае

$$M_j = \alpha - \beta n.$$

Пользуясь (119), легко определить время, необходимое для разгона электропривода от скорости n_1 до скорости n_2 .

$$t_{12} = \frac{GD^2}{375} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{\alpha - \beta n} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{1}{\beta} \ln \frac{\alpha - \beta n_1}{\alpha - \beta n_2} \quad (121)$$

или

$$t_{12} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_2 - n_1}{M_{j1} - M_{j2}} \ln \frac{M_{j1}}{M_{j2}} \quad (121')$$

Определяя по равенству (121') время для отдельных участков, можно найти полное время пуска. Аналогично может быть найдено и время торможения. Другие способы нахождения времени пуска будут рассмотрены далее.

В практике электропривода весьма часто важно знать путь, пройденный теми или другими органами исполнительного механизма за время пуска или торможения. Путь, пройденный той или другой точкой исполнительного механизма за какой-то период времени, пропорционален пути двигателя за тот же промежуток времени в оборотах (а не в оборотах в минуту), поэтому мы будем находить пройденный путь, выражая его в оборотах двигателя N . Ясно, что, зная N , можно найти путь в метрах тех или других частей механизма.

Очевидно, что бесконечно малое приращение пути в оборотах за бесконечно малый промежуток времени будет

$$dN = \frac{n}{60} \cdot dt,$$

если n — число оборотов в минуту, а время выражено в секундах.

Так как

$$dt = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{M_f},$$

то в общем случае

$$N_{12} = \frac{GD^2}{22\,500} \int_{n_1}^{n_2} \frac{n \cdot dn}{M_f}, \quad (122)$$

Рассмотрим и здесь частный случай изменения динамического момента от скорости по прямой.

Тогда

$$\left. \begin{aligned} N_{12} &= \frac{GD^2}{22\,500} \int_{n_1}^{n_2} \frac{n \cdot dn}{\alpha - \beta n} = \frac{GD^2}{22\,500} \left(\int_{n_1}^{n_2} \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{dn}{\alpha - \beta n} - \int_{n_1}^{n_2} \frac{1}{\beta} \cdot dn \right) = \\ &= \frac{GD^2}{22\,500} \left[\frac{\alpha}{\beta^2} \ln \frac{\alpha - \beta n_1}{\alpha - \beta n_2} - \frac{1}{\beta} (n_2 - n_1) \right]. \end{aligned} \right\} (123)$$

Подставляя в (123) вместо α и β их значения, получим

$$N_{12} = \frac{GD^2}{22\,500} \cdot \frac{n_2 - n_1}{M_{f1} - M_{f2}} \left[\left(\frac{n_2 - n_1}{M_{f1} - M_{f2}} \cdot M_{f1} + n_1 \right) \ln \frac{M_{f1}}{M_{f2}} - (n_2 - n_1) \right] \quad (124)$$

27. Потери энергии при пуске в ход электропривода с двигателями постоянного тока и асинхронными

Для выяснения в дальнейшем некоторых весьма существенных обстоятельств докажем, что потери в цепи якоря машины постоянного тока во время пуска равны кинетической энергии запасенной системой,

Для этих двигателей

$$U = E + IR = k_2 n + IR,$$

где R — сопротивление цепи якоря двигателя.

Соответственно потребляемая мощность

$$P = U \cdot I = k_2 \cdot n \cdot I + I^2 R = P_{\text{мех}} + P_{\text{электр}}, \quad (125)$$

Вращающий момент при пуске двигателя холостую, т. е. при отсутствии статических моментов нагрузки на его валу ($M_m = 0$), равен динамическому моменту или в данном случае механической мощности, деленной на угловую скорость

$$M_d = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{k_2 \cdot n \cdot I}{\omega},$$

откуда

$$I = \frac{4\pi^2}{60^2} \cdot \frac{J}{k_2} \frac{dn}{dt}.$$

Израсходованная двигателем во время пуска холостую энергия при угловой скорости холостого хода ω'_0

$$A = \int_0^{t_{p0}} U I dt = \int_0^{t_{p0}} k_2 \cdot n \cdot I \cdot dt + \int_0^{t_{p0}} R I^2 dt = \frac{4\pi^2}{60^2} \cdot J \int_0^{n'_0} n dn + \left. \begin{aligned} &+ \int_0^{t_{p0}} R I^2 dt = \frac{J \omega_0'^2}{2} + \int_0^{t_{p0}} R I^2 dt = A_{\text{мех}} + A_{\text{электр}}. \end{aligned} \right\} \quad (126)$$

Величина $A_{\text{мех}}$ представляет запасенную в системе живую силу, $A_{\text{электр}}$ представляет потери на джоулево тепло в цепи якоря.

Обозначим через n_0 идеальную скорость холостого хода без потерь. При этом $E = U = k_2 \cdot n_0$. В этом случае

$$A = \int_0^{t_{p0}} U I dt = \int_0^{n_0} k_2 n_0 \cdot \frac{4\pi^2}{60^2} \cdot \frac{J}{k_2} \cdot \frac{dn}{dt} \cdot dt = J \omega_0'^2. \quad (127)$$

Так как $A = A_{\text{мех}} + A_{\text{электр}}$, а $A_{\text{мех}} \approx \frac{J \omega_0'^2}{2}$, то и

$$A_{\text{электр}} = \frac{J \omega_0'^2}{2}. \quad (128)$$

Таким образом потерянная в цепи якоря электрическая энергия равна запасаемой в системе электрифицированного агрегата живой силе.

Аналогичный вывод можно получить и для асинхронных двигателей и синхронных, пускаемых в ход как асинхронные.

Электромагнитная мощность асинхронного двигателя

$$P_1 = P_{эл} = P_{мех} + P_{электр} = P_1 (1-s) + P_1 \cdot s, \quad (129)$$

где s — скольжение.

Работа, выполненная двигателем во время пуска,

$$\left. \begin{aligned} A &= \int_0^{t_{p0}} P_1 dt = A_{мех} + A_{электр} = \int_0^{t_{p0}} P_1 (1-s) dt + \\ &+ \int_0^{t_{p0}} P_1 \cdot s \cdot dt = \int_0^{t_{p0}} M_d \cdot \omega_0 dt = \int_0^{t_{p0}} M_d \cdot \frac{2\pi n_0}{60} dt, \end{aligned} \right\} \quad (130)$$

где M_d — вращающий момент, развиваемый двигателем за элемент времени dt , а ω_0 — синхронная угловая скорость вращающегося магнитного поля.

При пуске электропривода с асинхронным двигателем вхолостую или при $M_m = 0$

$$M_d = M_j = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Подставляя это соотношение в равенство (130), получаем

$$\left. \begin{aligned} A &= \int_0^{t_{p0}} M_d \cdot \frac{2\pi n_0}{60} dt = \int_0^{t_{p0}} J \cdot \frac{2\pi dn}{60} \cdot \frac{2\pi n_0}{60} dt = \int_0^{n'_0} \frac{4\pi^3}{60^2} \cdot J \cdot n_0 \cdot dn = \\ &= \frac{4\pi^3}{60^2} \cdot J \cdot n_0 \cdot n'_0 = J \omega_0^2 (1-s_0), \end{aligned} \right\} \quad (131)$$

так как $\omega'_0 = \omega_0 (1-s_0)$, где s_0 — скольжение.

Соответственно

$$\left. \begin{aligned} A_{мех} &= \int_0^{t_{p0}} P_1 (1-s_0) dt = \int_0^{t_{p0}} M_d \cdot \frac{2\pi n_0}{60} (1-s_0) dt = \\ &= \int_0^{n'_0} \frac{4\pi^3}{60^2} \cdot J \cdot n_0 (1-s_0) dn = \frac{J \omega_0^3}{2} (1-s_0)^2. \end{aligned} \right\} \quad (132)$$

Следовательно, для асинхронных двигателей получаем такое же соотношение для $A_{электр}$, как и для двигателей постоянного тока

$$A_{электр} = A - A_{мех} = J \omega_0^2 (1-s_0) - \frac{J \omega_0^3}{2} (1-s_0)^2. \quad (133)$$

Принимая, $(1 - s_0) \approx (1 - s_0)^2$, получаем

$$A_{\text{электр}} = \frac{1}{2} J \omega_0^2. \quad (128')$$

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Так как расход энергии при пуске электропривода вхолостую определяется всецело запасаемой системой живой силой и равен двойной ее величине при всех рассматриваемых типах двигателей, то необходимо стремиться к уменьшению приведенного махового момента системы во всех часто пускаемых электроприводах.

2. Так как количество энергии, теряемой в цепи ротора или якоря двигателей, при пуске вхолостую равняется запасаемой системой живой силе, то в целях уменьшения потерь в самом двигателе нужно также стремиться к уменьшению махового момента электропривода.

3. Поскольку поглощенное при пуске двигателя тепло в его цепи в случае машин постоянного тока и асинхронных двигателей с кольцами расходуется в обмотке якоря или ротора и в сопротивлениях, а в асинхронных короткозамкнутых двигателях расходуется лишь в обмотке ротора, то при данных средних (номинальных)¹ потерях в двигателе от асинхронного короткозамкнутого двигателя без специальных мер по интенсификации отвода тепла, невозможно получить то же допустимое число пусков в час, что от двигателей постоянного тока и асинхронных с кольцами, пускаемых под пусковым реостатом. Для получения короткозамкнутых двигателей, допускающих большое число пусков в час, необходимо принимать особые меры по уменьшению махового момента двигателей и уменьшению потерь в них.

Сделанный нами выше вывод касался пуска электропривода вхолостую при $M_m = 0$. При нагрузке картина несколько меняется. Здесь джоулевы потери в цепи якоря или ротора будут равны запасенной в системе кинетической энергии, увеличенной на некоторую часть полезно произведенной работы.

Проведем соответствующий вывод применительно к двигателю постоянного тока для $M_m = \text{const}$. Вывод для других типов двигателей аналогичен. В случае двигателя постоянного тока

$$M_d = \dot{M} + M_m = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} + M_m = \frac{EI}{\omega} = \frac{k_2 \cdot n \cdot I}{\omega}$$

Стало быть,

$$I = \frac{4\pi^2}{60^2} \cdot \frac{J}{k_2} \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{M_m}{k_2} \cdot \frac{2\pi}{60}$$

Полная, подведенная к двигателю во время пуска энергия (в пренебрежении железными и механическими потерями)

$$A = \int_0^{t_p} U I dt = k_2 \cdot n_0 \int_0^{t_p} I \cdot dt = k_2 \cdot n_0 \left[\int_0^{t_p} \left(\frac{4\pi^2}{60^2} \cdot \frac{J}{k_2} \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{M_m}{k_2} \cdot \frac{2\pi}{60} \right) dt \right] = \left. \begin{aligned} &= k_2 \cdot n_0 \cdot \frac{4\pi^2}{60^2} \cdot \frac{J}{k_2} \cdot n_s + k_2 \cdot n_0 \cdot \frac{M_m}{k_2} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot t_p = J \cdot \omega_0 \cdot \omega_s + M_m \omega_0 \cdot t_p, \end{aligned} \right\} \quad (134)$$

где ω_s — угловая скорость, соответствующая M_m .

Найдем далее $A_{\text{мех}}$:

$$\begin{aligned}
 A_{\text{мех}} &= \int_0^{t_p} EI dt = \int_0^{t_p} k_2 \cdot n \cdot Idt = \int_0^{t_p} \left(k_2 \cdot n \cdot \frac{4\pi^2}{60^2} \cdot \frac{J}{k_2} \cdot \frac{dn}{dt} \cdot dt + k_2 \cdot n \cdot \frac{M_m}{k_2} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot dt \right) = \\
 &= \int_0^{n_s} \frac{4\pi^2}{60^2} \cdot J \cdot n \cdot dn + \int_0^{t_p} \frac{2\pi}{60} \cdot M_m \cdot n \cdot dt = J \cdot \frac{\omega_s^2}{2} + M_m \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \int_0^{t_p} n \cdot dt. \quad (135)
 \end{aligned}$$

Площадь, представляемая интегралом $\int_0^{t_p} n \cdot dt$, может быть найдена графически. Примем для нее приближенное значение $S \approx \frac{n_s \cdot t_p}{2}$

В таком случае

$$A_{\text{мех}} = \frac{J \cdot \omega_s^2}{2} + M_m \cdot \omega_s \cdot \frac{t_p}{2}, \quad (136)$$

откуда потерянная в цепи двигателя электрическая мощность

$$A_{\text{электр}} = A - A_{\text{мех}} = J \cdot \omega_0 \cdot \omega_s + M_m \cdot \omega_0 t_p - \frac{J \omega_s^2}{2} - M_m \cdot \omega_s \cdot \frac{t_p}{2}.$$

Если для упрощения примем $\omega_0 \approx \omega_s$, то

$$A_{\text{электр}} \approx \frac{J \omega_s^2}{2} + M_m \cdot \omega_0 \cdot \frac{t_p}{2}. \quad (137)$$

Но принципиальный вывод, сделанный выше о влиянии кинетической энергии системы на нагрев двигателя, остается в силе и при пуске под нагрузкой.

28. Влияние выбора номинальной скорости двигателя на его маховой момент и потери при пуске

Из предыдущего видно, что: 1) время пуска и торможения электропривода прямо пропорционально величине его приведенного махового момента; 2) потери в главной цепи якоря или ротора двигателей во время пуска также определяются в первую очередь величиной запасаемой в маховых массах кинетической энергии электропривода и приводимого им механизма. Поэтому рабочие машины, пускаемые часто в ход, работающие при повторно-кратковременном режиме работы, должны приводиться двигателями с наименьшим маховым моментом.

Как известно, мощность любого электродвигателя

$$P = c \cdot D^2 \cdot l \cdot n, \quad (138)$$

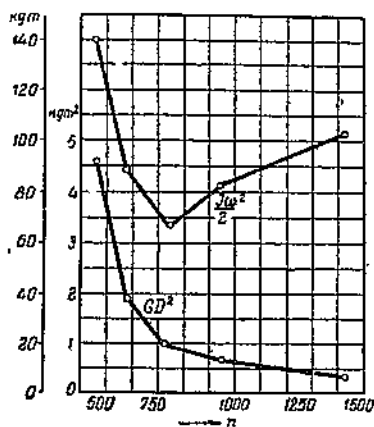
где c — машинная постоянная; D и l — диаметр и активная длина железа вращающегося якоря или ротора; n — число оборотов в минуту. Очевидно, что чем выше номинальная скорость двигателя, тем меньше его геометрические размеры при данной мощности, тем меньше его маховой момент и тем дешевле двигатель.

Вес якоря двигателя примерно пропорционален величине $D^2 l$. Таким образом маховой момент двигателя GD^2 пропорционален величине $D^4 \cdot l$. Конструируя машину определенной мощности, можно в соответствии с равенством (138) выбирать больший D , меньшую l или наоборот. Выбирая большую длину, мы уменьшаем пропорционально D^2 , а стало быть, сильно уменьшаем и GD^2 двигателя. Поэтому во всех тех случаях, где желательно иметь наи-

меньший маховой момент, в первую очередь при повторно-кратковременном режиме работы, необходимо конструировать и применять двигатели с увеличенной длиной и уменьшенным диаметром. По этому принципу конструируются все двигатели повторно-кратковременного режима, в частности, крановые двигатели, металлургического типа. Иногда с этой целью вместо одного двигателя берут два, половинной мощности или при больших мощностях (прокатные реверсивные двигатели) устраивают двухъякорный двигатель, т. е. тем самым понижают маховой момент посредством уменьшения диаметра при соответствующем увеличении длины.

При выборе номинального числа оборотов в минуту двигателя необходимо иметь в виду также и то, что при пуске электропривода в ход двигатель должен сообщить себе и рабочей машине живую силу, равную $\frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{\omega^2}{2}$. Чем меньше будет живая сила системы,

тем меньше расход энергии при ее пуске. Очевидно, что нагрев двигателя во время пуска в сильной степени зависит от маховых масс электропривода. При увеличении номинальной скорости при конструировании двигателя мы уменьшаем его GD^2 . Живая сила двигателя при определенной мощности при конструировании его для различных номинальных скоростей (nN) имеет минимум. При выборе номинального числа оборотов в минуту, соответственно минимуму живой силы, расход энергии на пуск двигателя вхолостую будет наименьшим. На фиг. 70 представлена зависимость GD^2 и $\frac{J\omega^2}{2}$



Фиг. 70. Зависимость махового момента и запасаемой двигателем живой силы от номинального числа его оборотов в минуту.

от скорости для двигателя одной и той же мощности в 5 кВт, но разных номинальных скоростей вращения n_N . Минимум живой силы получается в данном случае при $n_N = 750$ об/мин. Таким образом с точки зрения получения наименьшего расхода энергии при пуске рассматриваемого типа двигателя в 5 кВт следует считать наиболее подходящим номинальную скорость вращения в 750 об/мин. Подбор номинальной скорости вращения двигателей с точки зрения меньшего махового момента имеет наибольшее значение для двигателей с большим числом включений в час, какое необходимо, например, для вспомогательных механизмов при реверсивных прокатных станах и для некоторых металлорежущих станков.

29. Предварительный выбор наиболее выгодного передаточного числа между двигателем и исполнительным механизмом и практическое значение этого вопроса

Из изложенного выше следует, что при проектировании электропривода в ряде случаев, преимущественно при повторно-кратковременном режиме работы, нужно стремиться сводить к минимуму приведенный маховой момент инерции системы. Один из способов его уменьшения указан выше — это уменьшение махового момента самого двигателя. Вторым способом является правильный выбор передаточного числа от двигателя к рабочей машине. В простейшем случае при одной передаче от двигателя к рабочей машине с передаточным числом k приведенный к валу двигателя маховой момент системы будет равен

$$GD^2 = (GD^2)_d + \frac{(GL^2)_m}{k^2}.$$

В электроприводах продолжительного режима работы периоды пуска и торможения весьма редки, длительность их, а также и расход энергии в это время существенного значения часто не имеют. В подобных электроприводах выбор передаточного числа производится по существу исключительно из экономических соображений. Необходимо выбрать так передаточное число и номинальную скорость двигателя, чтобы первоначальная стоимость установки была наименьшей. Увеличение передаточного числа обычно повышает стоимость передачи и в свою очередь снижает стоимость двигателя, берущегося для более высокой скорости, т. е. с меньшими габаритами. Экономическое сопоставление должно выявить наиболее выгодный вариант. Принципиально, при сравнении разных вариантов необходимо вообще учесть и влияющие результирующего к. п. д. на эксплуатационные расходы.

Совершенно иначе обстоит дело при повторно-кратковременном режиме работы, в особенности с большим числом пусков в час. Здесь решающим фактором является производительность электри-

фицированного агрегата, определяемая в сильной степени временами пуска и торможения. Вопросы расхода энергии в таких приводах в переходных режимах отходят по сравнению с производительностью на второй план. Передаточное число между двигателем и рабочей машиной должно быть выбрано так, чтобы времена пуска и торможения сводились к минимуму. Полное и достаточно точное решение вопроса может быть достигнуто лишь детальным анализом уравнения движения электропривода, который будет излагаться позже. Здесь же мы рассмотрим этот вопрос лишь приближенно в целях предварительного выбора наиболее выгодного передаточного числа для решения уравнения движения привода. Окончательный ответ могут дать только разбираемые в дальнейшем детальные расчеты.

Приведем сначала простой пример. Положим, что маховой момент $(GD^2)_m$ рабочей машины на ее оси будет 400 kgm^2 . Возьмем два варианта двигателя при передаточных числах от двигателя к рабочей машине 3:1 и 2:1. Номинальные числа оборотов двигателей будут, положим, 600 об/мин и 400 об/мин. Номинальное число оборотов в минуту рабочей машины остается, естественно, неизменным в обоих случаях и равным 200 об/мин.

Маховые моменты рабочей машины, приведенные к валу двигателей, будут

$$(GD^2)_{mI} = \frac{400}{3^2} = 44,4 \text{ kgm}^2 \text{ и } (GD^2)_{mII} = \frac{400}{2^2} = 100 \text{ kgm}^2.$$

Маховые моменты двигателей $(GD^2)_{dI} = 20 \text{ kgm}^2$ и $(GD^2)_{dII} = 30 \text{ kgm}^2$. Моменты инерции передач для упрощения пренебрегаем. Приведенные маховые моменты системы будут

$$(GD^2)_I = 44,4 + 20 = 64,4 \text{ kgm}^2,$$

$$(GD^2)_{II} = 100 + 30 = 130 \text{ kgm}^2.$$

Приведенный маховой момент системы во втором случае будет примерно вдвое больше. Очевидно, что изменение приведенного махового момента системы должно пропорционально отразиться на продолжительности ее пуска.

Иногда, не продумав тщательно вопроса, полагают, что для ускорения производственного процесса нужно лишь повысить мощность двигателя. Однако в действительности дело обстоит не так. Простое увеличение мощности двигателя в подобных случаях может ничего не дать, так как увеличение мощности двигателя одновременно повышает его маховой момент, а стало быть, и приведенный маховой момент всей системы.

Постараемся рассмотреть задачу, хотя пока и несколько упрощенно, но в более общем виде, т. е. найдем выражение наиболее выгодного передаточного числа от двигателя к рабочей машине для переходных режимов пуска и торможения.

При работе исполнительного механизма тот или иной его рабочий орган должен пройти определенный путь. Для получения наибольшей производительности часть пути, приходящаяся на периоды пуска и торможения, должна быть пройдена в кратчайший срок. Возьмем частный случай равномерно ускоренного движения и $M_m = \text{const}$. В этом случае пройденный за время пуска путь в m

$$L = \frac{at^2}{2},$$

где a — постоянное ускорение рассматриваемой точки рабочей машины в m/sec^2 , а t — время ускорения в секундах. При заданном L наименьшее время t будет соответствовать максимальному ускорению a . Задача нахождения наивыгоднейшего передаточного числа сводится к определению максимального возможного значения a .

Рассмотрим сначала режим пуска. Принимая обычные обозначения, мы можем написать выражение для махового момента системы приведенного к валу двигателя

$$(GD^2) = (GD^2)_d + \frac{(GD^2)_m}{k^2}.$$

Ускоряющий (динамический) момент

$$\dot{M}_j = M_{dm} - \frac{M_s}{k \cdot \eta},$$

где $M_m = \frac{M_s}{k \cdot \eta}$ — представляет статический момент рабочей машины, приведенный к угловой скорости двигателя, а M_{dm} — средний пусковой момент двигателя. Постоянное угловое ускорение исполнительного механизма в об/мин/сек.

$$\alpha_m = \frac{n_m}{t_p} = \frac{n_{sd}}{t_p \cdot k} = \frac{375 \cdot M_j}{GD^2 \cdot k} = \frac{375}{k} \cdot \frac{M_{dm} - \frac{M_s}{k \cdot \eta}}{\frac{(GD^2)_m}{k^2} + (GD^2)_d} = \left. \begin{aligned} &= \frac{375 \left(k \cdot M_{dm} - \frac{M_s}{\eta} \right)}{(GD^2)_m + (GD^2)_d \cdot k^2} \end{aligned} \right\} (139)$$

Заметим, что $n_{sd} = n_m \cdot k$.

$$\text{В свою очередь } a = \frac{\pi D n_m}{60 t_p} = \frac{\pi D}{60} \cdot \alpha_m,$$

где D — диаметр рассматриваемой вращающейся точки механизма. Очевидно, что ускорение α_m будет тем больше, чем больше будет ускоряющий момент на валу рабочей машины, т. е. величина

$\left(k \cdot M_{dm} - \frac{M_s}{\eta}\right)$. При выбранном вращающем моменте двигателя он тем больше, чем больше k . В свою очередь ускорение будет тем больше, чем меньше маховой момент системы, отнесенный к валу рабочей машины, т. е. величина $(GD^2)_m + (GD^2)_d \cdot k^2$.

При данном $(GD^2)_d$ ускорение тем больше, чем больше k . Выражение (139) при некотором значении k имеет максимум.

Для нахождения оптимального α_m возьмем производную от равенства (139) по k и приравняем ее нулю.

В таком случае

$$\frac{d\alpha_m}{dk} = 375 \cdot \frac{M_{dm}[(GD^2)_m + k^2(GD^2)_d] - \left(k \cdot M_{dm} - \frac{M_s}{\eta}\right) \cdot 2k (GD^2)_d}{[(GD^2)_m + k^2(GD^2)_d]^2} \quad (139')$$

Приравняв числитель нулю и решая полученное квадратное уравнение, находим, что наиболее выгодное для пуска передаточное число

$$k_0 = \frac{\frac{M_s}{\eta}}{M_{dm}} + \sqrt{\frac{\left(\frac{M_s}{\eta}\right)^2}{M_{dm}^2} + \frac{(GD^2)_m}{(GD^2)_d}} \quad (140)$$

Ввиду того что k_0 —величина всегда положительная, перед корнем берем лишь знак (+). Взяв вторую производную от равенства (139'), легко убедиться, что мы имеем максимум α_m , так как при $k = k_0$

$$\frac{d^2\alpha_m}{dk^2} < 0.$$

Таким образом для каждого пускового режима электропривода с повторно-кратковременным режимом работы существует наиболее выгодное в отношении производительности передаточное число k_0 .

Рассмотрим такой частный случай напряженной работы электропривода, когда M_m мал по сравнению с M_d и, наоборот, когда маховой момент двигателя невелик по сравнению с маховым моментом рабочей машины, так что первым можно пренебречь. Тогда из (139) имеем

$$\alpha_m = \frac{375 \cdot k \cdot M_{dm}}{(GD^2)_m} \quad (141)$$

Равенство (141) показывает, что только при соблюдении двух выше отмеченных условий и при постоянном значении k ускорение будет повышаться пропорционально увеличению момента двигателя, т. е. пропорционально увеличению его мощности. А так как с ростом номинального момента двигателя M_N увеличивается его маховой момент и в общем случае меняется и k в связи с изменением номинального числа оборотов двигателя в минуту при переходе на другой тип двигателя, то выбор оптимального M_N при

наилучшем в отношении производительности k может быть сделан лишь путем ряда детальных пересчетов. В действительности, с увеличением M_N мы для k имеем обратное соотношение, чем требуется равенством (141), так как с увеличением мощности двигателя его номинальная скорость обычно понижается, т. е. k уменьшается.

Вопрос усложняется еще тем, что наивыгоднейшее передаточное число для пуска не равно наивыгоднейшему передаточному числу для торможения k'_0 . Рассмотрим упрощенно процесс торможения, полагая за время торможения $M_{dt} = \text{const}$. В этом случае тормозной момент

$$M_t = M_{dt} + \frac{M_s}{k} \cdot \beta.$$

Коэффициент β учитывает потери в передачах. Значение его зависит от направления передачи энергии в приводе. Численная величина β определяется соотношением M_{dt} и $\frac{M_s}{k}$ и маховых моментов осей двигателя и рабочего механизма. Если M_s целиком покрывается маховыми массами оси рабочей машины, то $\beta = 1$. В других случаях β может быть больше или меньше единицы. В таком случае замедление рабочей машины численно равно

$$\gamma_m = \frac{n_{sd}}{t_i \cdot k} = \frac{375 \left(M_{dt} + \frac{M_s}{k} \cdot \beta \right)}{\frac{(GD^2)_m}{k^2} + (GD^2)_d} = \frac{375(k \cdot M_{dt} + M_s \cdot \beta)}{(GD^2)_m + k^2 \cdot (GD^2)_d}$$

Взяв производную по k , получим

$$\frac{d\gamma_m}{dk} = \frac{375 \cdot M_{dt} [(GD^2)_m + k^2 \cdot (GD^2)_d] - (k \cdot M_{dt} + \beta \cdot M_s) \cdot 2k (GD^2)_d}{[(GD^2)_m + k^2 (GD^2)_d]^2} = 0.$$

Так как $\frac{d^2\gamma_m}{dk^2} < 0$, то мы имеем максимум.

В результате получаем

$$k'_0 = \frac{\beta \cdot M_s}{M_{dt}} + \sqrt{\frac{(\beta \cdot M_s)^2}{M_{dt}^2} + \frac{(GD^2)_m}{(GD^2)_d}}. \quad (141a)$$

Среднее значение из k_0 и k'_0 будет

$$k_m = \frac{k_0 + k'_0}{2}.$$

Вывод равенства (141) дает для практики очень мало, так как M_{dt} при торможении никогда не остается постоянным. Однако

приведенные соотношения могут служить для ориентировочного расчета. Окончательный выбор надлежащего передаточного числа может быть сделан лишь после ряда расчетов. Заметим, что существующие стандарты на двигатели повторно-кратковременного режима также несколько ограничивают возможность выбора наивыгоднейшего передаточного числа. Электромашиностроительные заводы при проектировании серии двигателей повторно-кратковременного режима далеко не всегда учитывают это исключительно существенное обстоятельство.

ГЛАВА IV

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

30. Общие замечания

Поведение электропривода с исполнительным механизмом в переходных режимах при пуске, изменении нагрузки, торможении зависит в первую очередь от характера изменения момента двигателя при изменении скорости. Зависимость этого момента от скорости определяет длительности переходных режимов, законы изменения тока, скорости, пути. Все необходимые для практических целей закономерности выясняются в результате решения уравнений движения электропривода. Соответственные решения получают путем подстановки в уравнение движения привода выражения для механической характеристики двигателя $M_d = f(n)$. Таким образом знание механических характеристик совершенно необходимо для решения задач переходных режимов и для определения мощности двигателя.

Различные исполнительные механизмы предъявляют исключительно разнообразные требования к механическим характеристикам двигателя. Только специальные комбинации последних могут разрешить иногда весьма сложные задачи изменения скорости, требуемые условиями работы данной производственной машины. Механические характеристики определяют собой величины тех сопротивлений, которые должны быть введены в схему двигателя. Необходимость в расчете этих сопротивлений существует не только при проектировке привода, но также при монтаже и эксплуатации. При этом иногда возникает необходимость изменения характеристик в связи с теми особенностями работы механизмов, которые часто выявляются лишь при эксплуатации.

Совершенный электропривод должен прежде всего удовлетворять требованиям исполнительных механизмов в отношении механических характеристик как в установившемся режиме работы, так и при переходных (пуск, торможение, переход от одной скорости или нагрузки к другой). При этом требованиям механизма должен вообще отвечать весь комплекс механических характеристик электропривода как естественных (без добавочных сопротивлений в цепях при полном напряжении), так и искусственных с добавочными сопротивлениями, при пониженном напряжении, в специальных схемах включения и т. д.

С механической точки зрения указанные характеристики отличаются по степени изменения скорости двигателя при увеличении момента нагрузки. При этом все механические характеристики могут быть разбиты на следующие группы:

1. **Сверхжесткая** скоростная характеристика со строго постоянной скоростью вращения, например, синхронный двигатель. Соответствующее ее наименование в электрических системах — синхронная.

2. **Жесткая** характеристика со сравнительно небольшим падением скорости от холостого хода до полной нагрузки, не выше 5—10%. Будем называть степенью жесткости отношение

$$\alpha \% = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \cdot 100 \%,$$

где n_0 — число оборотов в минуту двигателя при холостом ходе; n_N — требуемое или получающееся число оборотов в минуту при номинальной нагрузке. Таким характеристикам механизмов соответствуют шунтовые характеристики электродвигателей постоянного тока, коллекторных шунтовых, асинхронных до точки опрокидывания.

3. **Мягкая** (серьезная, компаундная) характеристика с большим относительным падением скорости от холостого хода до номинальной нагрузки. Численно степень мягкости характеристики выражается тем же самым отношением, что и степень жесткости. Если степень жесткости превосходит 10%, то характеристика считается вообще уже мягкой. Однако мягкой характеристикой считают обычно лишь машину, у которой степень жесткости достигает 20% и выше (серьезные двигатели, сильно компаундированные двигатели постоянного тока, шунтовый двигатель с большим сопротивлением в якоре, система Леонарда с трехобмоточным генератором, асинхронный с кольцами с большим сопротивлением в роторе, специально компаундированные каскадные системы). В целях большой четкости в разграничении характеристик необходимо введение термина:

4. **Полумягкая** характеристика (слабо компаундная). Сюда относятся машины и двигатели со степенью жесткости от 10 до 20%; например, слабо компаундированный двигатель постоянного тока, шунтовый двигатель с малым сопротивлением в якоре и т. п.

5. **Повышающаяся** (противокомпаундная) характеристика, имеющая место в шунтовых двигателях постоянного тока с сильной реакцией якоря или с противокомпаундированием. Применимость такой характеристики ограничивается отдельными очень редкими случаями в силу ее неустойчивости. Необходимо отметить, что повышающаяся характеристика двигателя нормально является неустойчивой. Устойчивая работа по этой части характеристики мо-

жет иметь место в отдельных специальных случаях лишь при повышенной характеристике механизма (например, вентилятор). Необходимо выделить еще одну категорию механических характеристик электродвигателя, которая по существу не имеет соответствия в свойствах исполнительных механизмов. Это: б—асинхронная характеристика. Особенность ее по сравнению со всеми предыдущими, как известно, заключается в том, что с некоторого предела (точки опрокидывания) момент двигателя при уменьшении скорости начинает падать, а не растет, как при жесткой и мягкой характеристиках. Асинхронная характеристика состоит таким образом из двух частей: от скольжения, равного нулю, и до точки опрокидывания — жесткая шунтовая и понижающаяся — от точки опрокидывания до скорости, равной нулю, и далее в сторону отрицательной скорости.

Необходимость получения от исполнительных механизмов высокой производительности и вполне устойчивой работы требует надлежащего соответствия механических характеристик двигателя потребностям механизма. Степень требуемой от двигателя жесткости характеристики или, иначе говоря, степень требуемого изменения его скорости с нагрузкой зависит всецело от свойств исполнительного механизма и характера производственного процесса. Так, производство бумаги, ситцепечатание, непрерывная горячая и холодная прокатка тонких листов требуют очень жесткой характеристики, иногда со степенью жесткости до 0,1—0,5%. Для подъемных механизмов считается более подходящая мягкая характеристика, однако многие из них прекрасно работают и при жесткой. Для большинства исполнительных механизмов необходима жесткая характеристика в целях получения нужной производительности.

Мягкая характеристика совершенно необходима в электроприводах с маховиками, где в целях уменьшения мощности двигателя и уменьшения капитальных затрат используется кинетическая энергия маховых масс, она нужна в экскаваторах, ледоколах, некоторых подъемно-транспортных механизмах.

Необходимая степень жесткости или мягкости характеристики достигается путем выбора двигателей соответствующих типов и посредством применения различной переключающей автоматической аппаратуры в их цепях.

31. Основные соображения о применении относительных величин к расчету механических характеристик

Для того чтобы расчеты механических характеристик производить по возможности проще, целесообразно отдельные величины выражать не в абсолютных единицах, а в относительных. Методика расчета в относительных единицах дает, как известно, возможность легко переносить расчеты с одного двигателя какого-

либо типа на другой того же типа. Методика расчета остается общей для многих случаев, меняются лишь масштабы. Так, если несколько шунтовых двигателей постоянного тока имеют одно и то же процентное изменение скорости между холостым ходом и полной нагрузкой, т. е. $\frac{n_0 - n_N}{n_0} \cdot 100\% = \text{const}$, то механическая

характеристика этих двигателей, выраженная в относительных единицах или в %, представится для всех этих двигателей одной и той же прямой [$(\mu\% = f(v\%))$]. Подобная характеристика носит название универсальной.

Будем далее относительные величины изображать малыми греческими буквами, процентные величины — малыми греческими буквами с добавкой значка %. Исключение по условиям начертания сделаем лишь для тока. В отличие от мгновенных значений тока, обозначаемых малыми буквами (i), относительные значения тока будем обозначать (i_ψ).

Под относительным напряжением и понимается величина

$$v = \frac{U}{U_N}, \quad (142)$$

где U_N — номинальное (паспортное) напряжение на зажимах двигателя. Напряжение в % будет

$$v\% = \frac{U}{U_N} \cdot 100\%. \quad (142')$$

В асинхронных двигателях приходится различать два номинальных напряжения: линейное напряжение статора и э. д. с. ротора при разомкнутом роторе. Смотря по тому, идет ли речь о статоре или роторе, напряжение приходится относить к номинальному напряжению статора или ротора. То же самое можно сказать относительно напряжений коллекторных двигателей переменного тока.

Относительный ток

$$i_\psi = \frac{I}{I_N}. \quad (143)$$

Соответственно

$$i_\psi\% = \frac{I}{I_N} \cdot 100\%. \quad (143')$$

Опять-таки в асинхронных двигателях приходится иметь дело с двумя номинальными токами — статора и ротора.

Говоря о сопротивлениях, приходится ввести понятие о нормальном сопротивлении.

Для двигателей постоянного тока всех типов под нормальным сопротивлением R_N понимается такое суммарное сопротивление

цепи главного (якорного) тока, включающее как внутреннее, так и внешнее сопротивление, через которое при номинальном напряжении сети U_N и неподвижном якоре пойдет номинальный ток в якоре I_N

$$R_N = \frac{U_N}{I_N}. \quad (144)$$

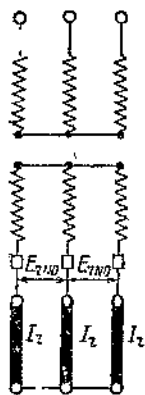
Относительное сопротивление определяют как:

$$\rho = \frac{R}{R_N}. \quad (145)$$

Сопротивление в %:

$$\rho \% = \frac{R}{R_N} \cdot 100\%. \quad (145')$$

Для асинхронных двигателей с кольцами под нормальным сопротивлением ротора понимается такое суммарное активное сопротивление каждой фазы роторной цепи, включающее как внутреннее, так и внешнее сопротивление, которое при номинальных напряжении и частоте тока в статоре обусловит номинальный ток в неподвижном роторе. Схема включения двигателя представлена на фиг. 71 применительно к звезде.



Фиг. 71. Схема трехфазного асинхронного двигателя.

Очевидно, что полное сопротивление ротора

$$Z_{rN} = \frac{E_{rN0}}{\sqrt{3} \cdot I_{rN}},$$

где E_{rN0} — э. д. с. при разомкнутом роторе на его кольцах, а I_{rN} — номинальный ток ротора.

Практически в покое двигателя при I_{rN} в рассматриваемых условиях

$$R_{rN} \approx 0,99 Z_{rN}.$$

В таком случае

$$R_{rN} = 0,99 \frac{E_{rN0}}{I_{rN} \sqrt{3}} = \frac{E_{rN0}}{1,75 \cdot I_{rN}}. \quad (146)$$

В случае соединения фаз треугольником из формулы (146) получается нормальное эквивалентное сопротивление, приведенное к звезде. Как известно, фазовые сопротивления при звезде и треугольнике находятся в следующих соотношениях

$$R_{r\lambda} = \frac{1}{3} R_{r\Delta}. \quad (147)$$

Такое соотношение получается из равенства потерь в меди в фазных обмотках ротора в случае соединения их треугольником (Δ) и эквивалентной звездой (λ)

$$3 I_{r\Delta}^2 \cdot R_{r\Delta} = 3 I_{r\lambda}^2 \cdot R_{r\lambda}.$$

Так как $I_{r\Delta} = \frac{I_{r\lambda}}{\sqrt{3}}$, то и получаем (147).

Аналогичные соотношения получаются для эквивалентных полных и реактивных сопротивлений.

Необходимо отметить соотношения между процентными сопротивлениями и процентными значениями токов и напряжений

$$\rho\% = \frac{R}{R_N} \cdot 100\% = \frac{\frac{U}{I}}{\frac{U_N}{I_N}} \cdot 100 = \frac{\frac{U}{U_N}}{\frac{I}{I_N}} \cdot 100 = \frac{\frac{U}{U_N} \cdot 100}{\frac{I}{I_N} \cdot 100} \cdot 100 = \left. \begin{aligned} &= \frac{v\%}{i_\psi\%} \cdot 100\% \end{aligned} \right\} (148)$$

где U — напряжение на зажимах сопротивления R при проходящем через него токе I .

При $U = U_N$

$$\rho\% = \frac{100}{i_\psi\%} \cdot 100\%. \quad (149)$$

Как для двигателей постоянного тока, так и асинхронных за номинальный момент M_N принимается полезный момент на валу двигателя при номинальных условиях:

а) в двигателях постоянного тока этот момент соответствует номинальному напряжению на зажимах двигателя, номинальному току в якоре и номинальному току в обмотке возбуждения;

б) в асинхронных двигателях этот момент соответствует номинальному напряжению, частоте и току в обмотке статора.

Номинальный полезный момент отличается от электромагнитного момента на величину потерь на трение в подшипниках и вентиляционных, на трение щеток о коллектор или кольца и на величину потерь тормозного момента, обусловленного гистерезисом и токами Фуко. В практических условиях электромагнитный момент для двигательного режима меньше, а для генераторного режима больше в 1,01—1,03 раза по сравнению с полезным. Эта разница настолько незначительна, что ею можно пренебречь.

В таком случае относительный момент

$$\mu = \frac{M}{M_N}; \quad (150)$$

$$\mu \% = \frac{M}{M_N} \cdot 100\%. \quad (150')$$

Несколько своеобразно в разных типах двигателей понятие о процентных скоростях. В шунтовых двигателях постоянного тока за 100%, принимают скорость идеального холостого хода n_0 , при которой индуктированная э. д. с. равна приложенному напряжению. Очевидно, что сила тока в якоре двигателя равна при этом нулю. Подобная скорость может быть получена, если машина будет вращаться, как генератор, внешней силой вхолостую.

Относительная скорость

$$v = \frac{n}{n_0} \quad (151)$$

и

$$v \% = \frac{n}{n_0} \cdot 100\% \quad (151')$$

Для асинхронных двигателей скорости вращения относят к синхронному числу оборотов вращающегося магнитного поля n_0 . Как в том, так и в другом типе двигателей можно говорить о скольжении

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}. \quad (152)$$

Выражая s в процентах, получаем

$$s \% = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot 100\% = \frac{n_0}{n_0} \cdot 100 - \frac{n}{n_0} \cdot 100 = \left(100 - \frac{n}{n_0} \cdot 100\right)\%. \quad (152')$$

Отсюда получаем

$$s \% = 100 - v\%. \quad (152'')$$

Для серийных и компаундных двигателей за 100% скорости принимают номинальное число оборотов в минуту n_N . В двигателях повторно-кратковременного режима за основные номинальные величины считают таковые для режима с $\zeta = 25\%$.

32. Механические характеристики шунтового двигателя постоянного тока

Аналитическое выражение для механической характеристики получается из выражения для вращающего момента этого двигателя

$$M_d = c \cdot I \cdot \Phi.$$

Беря двигатель с компенсационной обмоткой или пренебрегая в обычном двигателе реакцией якоря, что обычно для решения уравнений движения привода вполне возможно, мы можем получить, что $\Phi = \text{const}$. В таком случае

$$M_d = k_1 I,$$

но

$$I = \frac{U - E}{R}.$$

Следовательно,

$$M_d = k_1 \cdot \frac{U - E}{R},$$

где R — общее сопротивление цепи якоря, включая и внутреннее сопротивление двигателя.

Обратная э. д. с. якоря

$$E = c_1 \cdot n \cdot \Phi.$$

Заменим напряжение $U = c_1 \cdot n_0 \Phi$, где n_0 — число оборотов идеального холостого хода, при котором обратная э. д. с. точно равна приложенному напряжению, а ток якоря равен нулю. В таком случае

$$M_d = k_1 \cdot \frac{c_1 \cdot n_0 \Phi - c_1 \cdot n \cdot \Phi}{R} = \alpha - \beta n, \quad (153)$$

где α и β — постоянные, зависящие от параметров машины и сопротивлений цепи якоря R и равные

$$\alpha = \frac{k_1 c_1 \cdot n_0 \cdot \Phi}{R}; \quad \beta = \frac{k_1 c_1 \Phi}{R}.$$

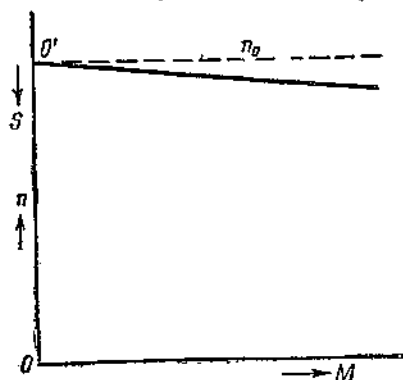
Вводя для шунтового двигателя понятие скольжения

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0},$$

можно получить и другое выражение для M_d через s , а именно

$$M_d = c_2 \frac{n_0 - n}{R} = \frac{c_2}{R} \cdot \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot n_0 = \alpha \cdot s = \frac{M_N}{s_N} \cdot s. \quad (154)$$

Приведенные выражения (153) и (154) показывают, что механическая характеристика шунтового двигателя является прямой линией; она представлена на фиг. 72. Очевидно, что переход от вида характеристики (153) к (154) вызывает перенесение начала координат из точки O в точку O' .



Фиг. 72. Механическая характеристика шунтового двигателя.

Все коэффициенты равенств (153) и (154) легко могут быть определены из основных данных машины:

при $n=n_0$ $M_d=0$; при $n=n_N$ $M_d=M_N$; $s=s_{N\cdot}$

Следовательно, подставляя эти соотношения в равенство (153), получим

$$0 = \alpha - \beta n_0,$$

$$M_N = \alpha - \beta n_N = \beta n_0 - \beta n_N,$$

откуда

$$\beta = \frac{M_N}{n_0 - n_N}; \quad \alpha = \frac{M_N \cdot n_0}{n_0 - n_N} = \frac{M_N}{s_N}. \quad (155)$$

Выразим механическую характеристику шунтового двигателя также в относительных единицах и процентах. Для этого обратимся к равенству, определяющему равновесие э. д. с. в якорной цепи двигателя,

$$U_N = E + IR.$$

Выражая это равенство в относительных единицах, получим

$$\frac{U_N}{U_N} = \frac{E}{U_N} + \frac{IR}{U_N} = \frac{E}{U_N} + \frac{IR}{I_N \cdot R_N}$$

или

$$1 = \varepsilon + i_\psi \rho, \quad (156)$$

где ε , i_ψ и ρ — э. д. с., ток и сопротивление в относительных единицах. Если же это равенство выразить в процентах, то получим

$$\frac{U_N}{U_N} \cdot 100 = \frac{E}{U_N} \cdot 100 + \frac{IR}{U_N} \cdot 100 = \frac{E}{U_N} \cdot 100 + \frac{I}{I_N} \cdot \frac{R}{R_N} \cdot 100\%,$$

откуда

$$100\% = \varepsilon\% + \frac{i_\psi\% \cdot \rho\%}{100}. \quad (157)$$

Так как $E = c_1 n \Phi$, то $\varepsilon = \nu$ или $\varepsilon\% = \nu\%$. (158)

И так как $M = c \cdot I \cdot \Phi$, то $\rho = i_\psi$ или $\rho\% = i_\psi\%$. (159)

Подставляя (158) и (159) в (157), получим

$$\nu\% = 100\% - \frac{\rho\%}{100} \cdot \mu\%. \quad (160)$$

Из равенства (160) можно получить и другие соотношения.

Так как согласно (152'')

$$\sigma\% = 100 - \nu\%,$$

то

$$\sigma\% = \frac{\rho\%}{100} \cdot \rho\%. \quad (161)$$

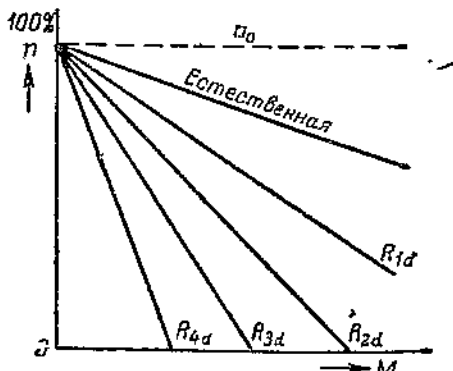
При номинальном моменте шунтового двигателя, т. е. при $\mu\% = 100\%$

$$\sigma\% = \rho\% \quad (161')$$

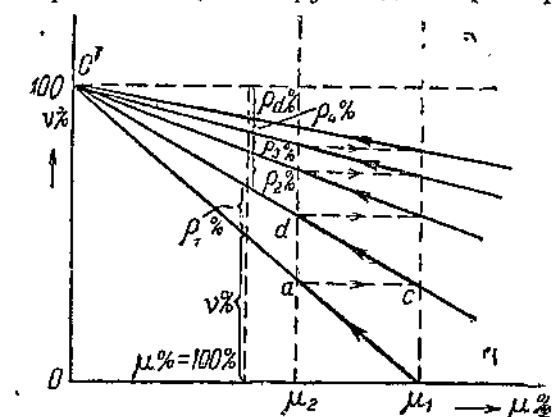
и

$$\nu\% = 100 - \rho\%. \quad (161'')$$

Все приведенные равенства показывают, что механическая характеристика шунтового двигателя прямолинейна. Механические характеристики шунтовой машины в двигательном режиме представлены для разных сопротивлений, в цепи якоря на фиг. 73. Верхняя характеристика относится к случаю отсутствия добавочного сопротивления якорной цепи и носит название естественной. Остальные характеристики с добавочным сопротивлением в цепи якоря носят название искусственных. Чем больше введенное в цепь якоря сопротивление, тем круче идет характеристика.



Фиг. 73. Механические характеристики шунтового двигателя при разных сопротивлениях в цепи якоря.



Фиг. 74. Графический расчет пускового реостата для шунтового двигателя.

$$\nu\% = 100 - \frac{\rho_d\% + \rho_x\%}{100} \cdot \mu\%. \quad (160')$$

Характеристики легко могут быть рассчитаны также графическим способом. Положим, нам требуется рассчитать пусковые сопротивления двигателя при условии колебания при пуске момента (или тока) от $\mu_1\%$ до $\mu_2\%$. Соответствующее построение приведено на фиг. 74. Очевидно, что в покое двигатель развивает

момент $\mu_1\%$. Проводим соответствующую характеристику через точки 100% скорости (v_0) на оси ординат и точку $\mu_1\%$ (M_1) на оси абсцисс. После включения двигатель повышает скорость, разгоняясь по этой характеристике до точки a , соответствующей $\mu_2\%$. В этой точке двигатель должен быть переключен практически мгновенно (причем во время переключения скорость не меняется) в точку c , где $\mu\% = \mu_1\%$. Далее разгон будет происходить по этой характеристике до точки d , соответствующей $\mu\% = \mu_2\%$ и т. д. до естественной характеристики. Все характеристики проходят через точку O' , соответствующую 100% скорости.

Согласно равенству (161) при $\mu = 100\%$

$$\sigma\% = \rho\% \quad \text{или} \quad v\% = 100\% - \rho\%.$$

Поэтому проводим вертикаль через точку $\mu = 100\%$. Вертикальные отрезки этой прямой дают, как показано на фиг. 74, полные сопротивления отдельных ступеней в процентах и сопротивление отдельных ступеней реостата в процентах.

При расчете можно исходить из предельных значений $\mu_1\%$ и $\mu_2\%$. Тогда получим число ступеней реостата. Обратно, исходя из выбранного числа ступеней реостата, получаем предельные значения $\mu_1\%$ и $\mu_2\%$. Величины сопротивлений ступеней в омах легко могут быть найдены по равенству

$$R_x = \frac{\rho_x\%}{100} \cdot R_N. \quad (162)$$

Представленные на фиг. 73 характеристики относятся лишь к двигательному режиму. Для целей электропривода существенное значение имеют также тормозные режимы. Они необходимы как для быстрой остановки двигателя вообще, для остановки в определенном месте, для аварийной остановки, так и для быстрого реверсирования, являющегося во многих случаях основой высокой производительности. Электрическое торможение шунтового двигателя вообще может быть сделано тремя способами:

1. Генераторное торможение с рекуперацией энергии, когда машина приводится исполнительным механизмом со скоростью выше n_n . Эта часть характеристики является продолжением двигательной характеристики в сторону квадранта II (фиг. 75). Машина работает генератором, отдавая энергию в сеть, в которую она включена.

В этом случае ток (генераторный)

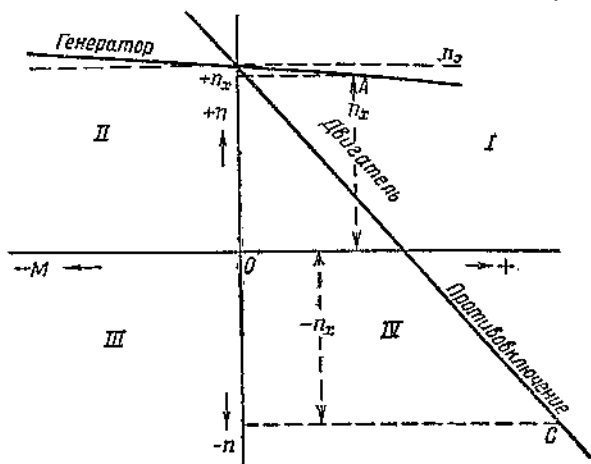
$$I = \frac{E - U}{R}. \quad (163)$$

То, что ток меняет направление при переходе через n_n , видно также из равенства (163). При $E > U$

$$\frac{U - E}{R} < 0, \quad (163')$$

т. е. выражение для тока меняет свой знак.

2. Режим противовключения, когда машина вращается исполнительным механизмом в сторону, обратную по сравнению с тем направлением вращения, для которого включены ее обмотки. Это может иметь место при спуске груза под влиянием силы тяжести при включении обмоток двигателя на подъем. То же самое может быть достигнуто при переключении двигателя для



Фиг. 75. Механические характеристики шунтового двигателя для разных режимов работы.

быстрой остановки на другое направление вращения. Под влиянием запасенной живой силы двигатель продолжает вращаться в прежнем направлении, в то время как обмотки включены для обратного направления вращения. В этом случае обратная э. д. с. E действует согласно с приложенным напряжением. Ток в цепи двигателя

$$I = \frac{U + E}{R}. \quad (164)$$

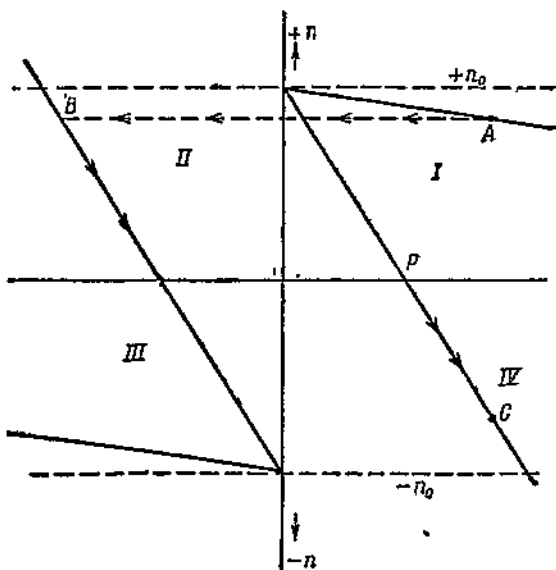
Соответственно

$$PR = UI + EI. \quad (165)$$

Мощность, расходуемая в цепи двигателя на джоулево тепло, подводится к двигателю двойным путем: 1) от сети UI и 2) от рабочего механизма EI . При этом нужно иметь в виду, что энергия, поглощаемая из сети, целиком тратится на потери в добавочном сопротивлении и в создании тормозного момента непосредственно не участвует [Л. 51, 52].

Режим противовключения возможен практически лишь при введении в цепь двигателя достаточного сопротивления, так как в противном случае через двигатель может пойти ток, недопустимый в отношении коммутации, а иногда после длительной работы двигателя и в отношении нагрева. Так как сопротивление

обмотки якоря двигателя мало, то большая часть подведенной к двигателю механическим и электрическим путем энергии расходуется почти целиком на нагрев добавочного сопротивления. В части UI эта энергия поступает из сети в виде электрической мощности. В части EI энергия получается механическим путем с вала рабочей машины. Если по достижении $n=0$ или $s=1$ электродвигатель не будет отключен от сети, то он начнет вращаться в другую сторону. Механическая характеристика режима противовключения расположена при отрицательной скорости в квадранте IV и является плав-



Фиг. 76. Переход машины из двигательного режима в тормозной.

ным продолжением двигательной механической характеристики. Как уже отмечено выше, для перехода от двигательного режима к режиму противовключения переключают обмотки двигателя, и последний, будучи включен в точке A двигательной характеристики квадранта I с n_x , попадает в точку C тормозной характеристики квадранта IV ($-n_x$) (фиг. 75). То же самое можно показать несколько иначе, начертив совместно (фиг. 76) характеристики двигателя для одного и другого направления вращения. При этом двигатель с точки A квадранта I при переключении попадает по горизонтали в точку B квадранта II . Мы принимаем переход по горизонтали, полагая, что скорость двигателя за время переключения не успевает изменить своей величины. В случае отрицательной статической нагрузки (большой груз) двигатель, будучи включен на подъем, вращается в направлении спуска, идя по характе-

ке противовключения вниз от точки P до точки C , в которой достигается равновесие между движущим моментом груза и тормозным моментом двигателя, и динамический момент становится равным нулю.

3. Режим динамического торможения, при котором якорь двигателя отключается от сети и замыкается на сопротивление, обмотка возбуждения остается приключенной к сети. Двигатель работает генератором, получая энергию за счет запасенной в маховых массах живой силы и отдавая ее в сопротивление цепи якоря.

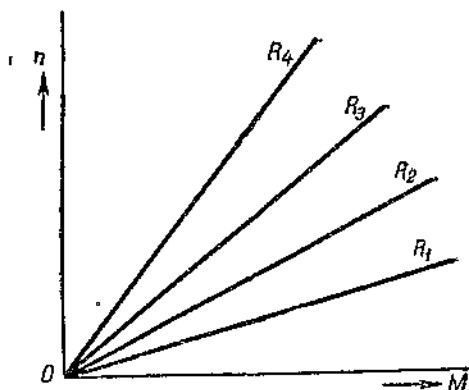
В этом случае тормозной момент $M_t = c \cdot I \cdot \Phi$. Пренебрегая реакцией якоря и полагая $\Phi = \text{const}$, мы можем написать

$$M_t = k_1 I = k_1 \cdot \frac{E}{R} = k_1 \frac{c \cdot n}{R} = c_1 \cdot \frac{n}{R} \quad (166)$$

При неизменном сопротивлении цепи якоря R механическая характеристика динамического торможения шунтового двигателя носит прямолинейный характер и проходит через начало координат. Семейство характеристик динамического торможения при разных значениях сопротивления представлено на фиг. 77. На практике чаще всего применяется динамическое торможение и противовключение.

Рекуперативное торможение может быть использовано сравнительно редко, но существует в регулируемых двигателях, работающих с регулировкой скорости током возбуждения и в подъемных механизмах при спуске груза.

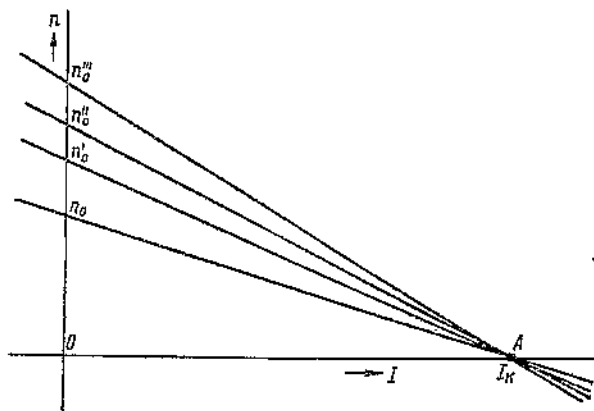
Рассмотрим относительное расположение механических характеристик шунтового двигателя при $U = \text{const}$ и регулировке его скорости током возбуждения в пренебрежении влиянием реакции якоря. Очевидно, что каждая из механических характеристик, соответствующая определенному току возбуждения, а стало быть и определенному магнитному потоку Φ_x , будет иметь свое собственное число оборотов в минуту идеального холостого хода $n_{0x} = \frac{U}{c \cdot \Phi_x}$ тем большее, чем меньше поток возбуждения. В покое двигателя через обмотку его якоря при любом токе возбуждения должен проходить один и тот же ток короткого замыкания $I_k = \frac{U}{R_a}$. Следовательно, прямолинейные зависимости $n = f(I)$ для всех потоков возбуждения будут пересекаться в одной точке на



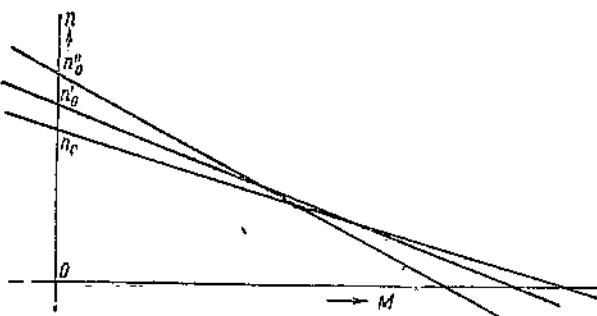
Фиг. 77. Семейство характеристик динамического торможения.

оси абсцисс и будут иметь вид, представленный на фиг. 78а. Нужно иметь в виду, что при отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря для двигателя в покое I_k имеет недопустимую практически величину.

Если вместо зависимостей $n=f(I)$ представить механические характеристики $n=f(M)$ для разных токов возбуждения, то они получат вид фиг. 78б. В этом случае любые две характеристики



Фиг. 78а. Характеристики $n=f(I)$ при разных токах возбуждения шунтового двигателя.



Фиг. 78б. Механические характеристики шунтового двигателя при разных токах возбуждения $n=f(M)$.

будут пересекаться в некоторой точке, лежащей выше оси абсцисс, причем точки пересечения отдельных характеристик уже совпадать не будут, так как при переменном потоке возбуждения пропорциональность между моментом и током уже не имеет места. Так как

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{c \cdot \Phi_1 \cdot I_1}{c \cdot \Phi_2 \cdot I_2},$$

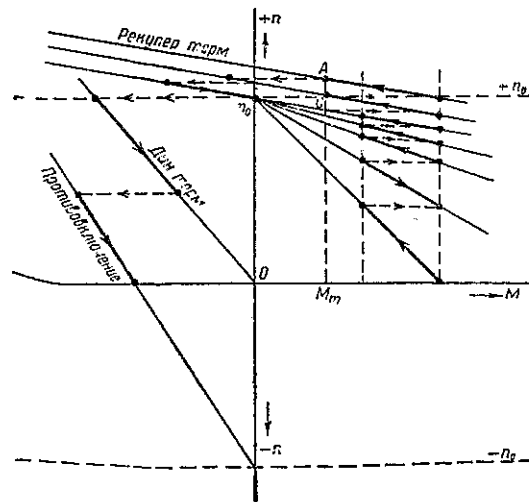
то переход от характеристик $n=f(I)$ к $n=f(M)$ простым изменением масштаба оси абсцисс получен уже быть не может. Каж-

дая прямолинейная характеристика может быть найдена по двум точкам: 1) скорости идеального холостого хода $n_{0v} = \frac{U}{c\Phi_x}$

при $M=0$; 2) скорости $n=0$, соответствующей моменту покоя $M_k = c_1 \cdot \Phi_x \cdot I_A$.

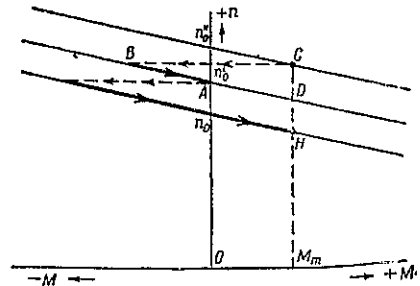
Рассмотрев механические характеристики при разных значениях потока возбуждения, обратимся теперь к рассмотрению торможения электропривода с шунтовой машиной путем рекуперации.

Полджим, что двигатель имеет при полном потоке Φ скорость идеального холостого хода n_0 , а при ослабленном поле Φ' скорость идеального холостого хода $n_0'' > n_0$ (фиг. 78 с). Для торможения от n_0'' до n_0 мы шунтируем сопротивление в цепи возбуждения, что ведет к быстрому увеличению потока от Φ' до Φ . Это эквивалентно переходу машины на генераторный режим в точку B (при $n = \text{const}$).



Фиг. 79. Переход по механическим характеристикам при пуске и торможении.

На фиг. 79 для примера показан последовательный переход электропривода с одной характеристики на другую. Работа привода происходит при статическом моменте M_m . Начав с положения покоя $n=0$, двигатель проходит по пусковым характеристикам и доходит до точки C , соответствующей $M_d = M_m$. Далее путем постепенного включения сопротивлений в цепь возбуждения ступенями двига-



Фиг. 78с. Переход по характеристикам при рекуперативном торможении.

генераторный режим в точку B (при $n = \text{const}$). От точки B до точки A машина работает генератором, рекуперируя энергию обратно в сеть за счет уменьшения живой силы привода. При отсутствии дальнейших переключений машина перешла бы снова на двигательный режим и начала бы далее устойчиво работать в точке D . Электрическое торможение от основной скорости идеального холостого хода до покоя может быть проделано или методом противовключения или методом динамического торможения.

тель доходит до высшей скорости и работает в точке А, соответствующей M_m .

Для остановки сначала применено рекуперативное торможение. После достижения скорости n_0 , когда этот вид торможения становится неосуществимым, используется сначала динамическое торможение, а затем торможение противовключением. Все указанные операции переключения двигателя легко могут быть осуществлены автоматически. Все три вида торможения в одной схеме практически встречаются редко. Нами на фиг. 79 показан совместный переход по всем видам характеристик для лучшего их усвоения.

Расчет характеристик для торможения и сопротивлений для них выполняется аналогично тому, как это было сделано и для двигательного режима.

Возьмем случай рекуперативного режима. В нем

$$I = \frac{U - E}{R}.$$

Так как попрежнему $M = c_1 I \Phi$, то тормозной момент

$$M_t = \alpha - \beta n.$$

Так как $\beta n > \alpha$, то M_t имеет отрицательную величину.

Значения α и β даются попрежнему равенством (155). Соответственно по аналогии с равенством (160) можно написать

$$\nu\% = 100\% + \frac{\rho\%}{100} \mu\%. \quad (167)$$

Соответственно отрицательное скольжение

$$\left. \begin{aligned} \sigma\% &= \frac{\rho\%}{100} \mu\%, \\ \sigma\% &= 100 - \nu\%. \end{aligned} \right\} \quad (160)$$

Для режима противовключения

$$I = \frac{E + U}{R}.$$

Соответственно тормозной момент будет равен

$$M_t = \alpha + \beta n.$$

Попрежнему

$$100 + \nu\% = \frac{\rho\%}{100} \mu\%.$$

Отсюда

$$\rho\% = \frac{100 + \nu\%}{\mu\%} \cdot 100. \quad (168)$$

Так как $\nu\% = \varepsilon\%$, а $\mu\% = i_\psi\%$, то $\rho\% = \frac{100 + \varepsilon\%}{i_\psi\%} \cdot 100. \quad (169)$

В эту величину $\rho\%$ входят все сопротивления, которые включены в цепь якоря двигателя в режиме противовключения. Необходимо для осуществления режима добавочное сопротивление, называемое сопротивлением противовключения, получится, если мы из указанного значения $\rho\%$ вычтем сопротивления обмотки якоря двигателя и пусковое.

При динамическом торможении

$$M_t = c' \cdot \frac{n}{R}.$$

В пренебрежении реакцией якоря суммарное сопротивление цепи якоря будет

$$R = \frac{E}{I} = \frac{R}{R_N} \cdot \frac{U_N}{I_N}.$$

Отсюда

$$\rho\% = \frac{R}{R_N} \cdot 100 = \frac{E}{U_N} \cdot \frac{I_N}{I} \cdot 100 = \frac{e\%}{i_\psi\%} \cdot 100. \quad (170)$$

Исходя из максимального тока, допустимого по условиям коммутации и максимальной э. д. с. $e\% = v\%$, можно из (170) найти величину $\rho\%$:

$$\rho\% = \frac{v\%}{i_\psi\%} \cdot 100. \quad (171)$$

Величина $\rho\%$ включает и сопротивление якоря. Отнимая последнее, получим собственно сопротивление динамического торможения.

В том случае, когда расчет ступени динамического торможения ведется для регулируемого шунтового двигателя с ослабленным полем, появляются некоторые осложнения. Трудности получаются благодаря тому, что магнитный поток при увеличении тока возбуждения возрастает не сразу. Детальное рассмотрение этого вопроса выходит за пределы данного учебника. Здесь укажем лишь ориентировочный способ подсчета. Практически можно принять в первый момент включения на динамическое торможение поток Φ двигателя равным искомому минимальному значению.

Пусть повышение скорости двигателя по сравнению с основной скоростью будет в отношении δ . В таком случае

$$n_\delta = n_0 \cdot \delta.$$

Соответственно

$$\frac{n_\delta}{n_0} = \frac{\Phi_0}{\Phi_\delta} = \delta.$$

При полном поле Φ_0

$$i_\psi\% = \mu\%.$$

При ослабленном поле

$$i_{\psi} \% = \delta \cdot \mu \%.$$

В таком случае

$$\rho \% = \frac{\nu \%}{\delta \cdot \mu \%} \cdot 100. \quad (172)$$

Без детального сопоставления сравним кратко различные перечисленные выше способы электрического торможения [Л. 52].

Прежде всего отметим, что применение электрического торможения в часто пускаемых приводах вызывает естественно повышение мощности двигателя по сравнению с работой без электрического торможения, так как во время электрического торможения в двигателе выделяются потери.

Как уже указано выше, рекуперативное торможение представляется возможным применять практически сравнительно редко. Выбор между противовключением и динамическим торможением зависит от ряда факторов: требуемой быстроты торможения и необходимой точности останова. Кроме того при выборе играют роль особенности компоновки автоматических схем и величина расхода энергии.

Противовключение дает более эффективное торможение при одинаковых исходных токах в якоре, так как тормозной момент при противовключении меняется мало, а при динамическом торможении падает до нуля.

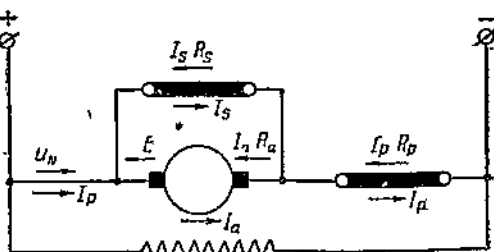
Можно показать, что при равных временах торможения потери при противовключении больше, а стало быть тепловая нагрузка на двигатель сильнее, чем при динамическом торможении. При равных путях торможения потери практически одинаковы для обоих способов. В целом для шунтовой машины режим противовключения легче динамического торможения. Динамическое торможение считается более точным, так как при торможении противовключением двигатель в случае оставления его приключенным к сети стремится разворачиваться в другую сторону. Однако в настоящее время существуют реле, которые отключают двигатель при приближении к нулевой скорости. Практически для реверсивных приводов чаще применяют противовключение, для нереверсивных применяют динамическое торможение, так как схема для него проще.

33. Механические характеристики шунтового двигателя при шунтированном якоре и последовательном сопротивлении

Рассмотренные нами выше механические характеристики шунтового двигателя не удовлетворяют всем разнообразным требованиям электропривода. Иногда требуются характеристики, пересекающие ось ординат при скорости меньшей, чем n_0 . Требуются малые так называемые ползучие скорости. Последние необходимы в ряде случаев для предварительного снижения скорости электр-

привода в целях более точной остановки его в необходимом месте. Подобные схемы могут требоваться также для режимов с отрицательной нагрузкой для более ровного торможения. Применение специальных характеристик с шунтировкой якоря в шунтовой машине сравнительно ограничено. Однако мы их рассмотрим подробно в целях лучшего уяснения аналогичных характеристик в приводе с серийными двигателями.

Схема шунтового двигателя с шунтированным якорем представлена на фиг. 80. Там же показаны направления токов и э. д. с. при работе машины в двигательном режиме.



Фиг. 80. Схема шунтового двигателя с шунтированным якорем и последовательным сопротивлением.

Для нахождения механической характеристики двигателя в рассматриваемой схеме напишем равенства, связующие отдельные величины в соответствии с законами Кирхгофа:

$$U_N - I_s R_s - I_p R_p = 0, \quad (173)$$

$$E + I_a R_a - I_s R_s = 0, \quad (174)$$

$$I_p = I_s + I_a. \quad (175)$$

Определяя I_s из (175) и подставляя в (173), имеем

$$U_N - (I_p - I_a) R_s - I_p R_p = 0,$$

откуда ток в последовательном сопротивлении

$$I_p = \frac{U_N + I_a R_s}{R_p + R_s}. \quad (176)$$

Соответственно ток в шунтирующем сопротивлении

$$I_s = I_p - I_a = \frac{U_N + I_a R_s}{R_s + R_p} - I_a = \frac{U_N - I_a R_p}{R_s + R_p}. \quad (177)$$

Подставляя значение I_s в (174), получим

$$E + I_a R_a - \frac{U_N - I_a R_p}{R_p + R_s} \cdot R_s = 0$$

или

$$E = U_N \cdot \frac{R_s}{R_s + R_p} - \left(R_a + \frac{R_s \cdot R_p}{R_s + R_p} \right) \cdot I_a. \quad (178)$$

Заменим в (178) E и I_a через равенства

$$E = U_N \frac{n}{n_0}; \quad I_a = \frac{I_N}{M_N} \cdot M.$$

Получим

$$n = n_0 \cdot \frac{R_s}{R_s + R_p} - \frac{n_0 \cdot I_N}{M_N \cdot U_N} \left(R_a + \frac{R_s \cdot R_p}{R_s + R_p} \right) \cdot M. \quad (179)$$

Это равенство показывает, что все механические характеристики шунтового двигателя с шунтированным якорем и последовательными сопротивлениями прямолинейны.

Из него также видно, что скорость, при которой машина переходит из двигательного режима в генераторный, т. е. при $M=0$,

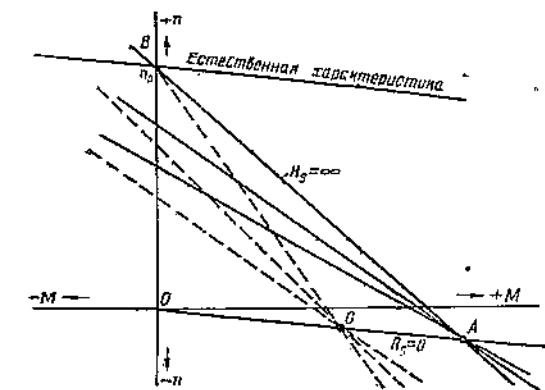
$$n_{0s} = n_0 \cdot \frac{R_s}{R_s + R_p} < n_0. \quad (180)$$

Интересно отметить, что при неизменном последовательном сопротивлении R_p и различных шунтирующих R_s все механические характеристики одного и того же двигателя будут пересекаться в одной точке. Это может иметь место, очевидно, лишь в том случае, когда шунтирующее сопротивление не будет оказывать

влияния на ток якоря. Подобное условие может осуществляться лишь при некоторой отрицательной скорости, когда

$$E = -I_a R_a \quad (181)$$

т. е. когда э. д. с., индуцированная в якоре, будет лишь покрывать омическое падение напряжения в якоре и будет направлена ему навстречу. В этом случае напряжение на щетках якоря будет равно



Фиг. 81. Семейство характеристик при $R_p = \text{const}$ и $R_s = \text{var}$.

нулю. Весь ток, проходящий через последовательное сопротивление, пойдет через якорь $I_s=0$. Машина будет работать в режиме противовключения. Через эту точку пойдет характеристика двигателя и без шунтированного якоря и с шунтированным якорем.

Соответствующее семейство характеристик при $R_p = \text{const}$ и $R_s = \text{var}$ представлено сплошными линиями на фиг. 81.

Все характеристики пересекаются в точке A .

Характеристика при отсутствии шунта ($R_s = \infty$) проходит кроме того через точку B , соответствующую n_0 . Характеристика при

$R_s = 0$ проходит через начало координат. Остальные характеристики лежат в промежутке между двумя указанными.

Если мы возьмем другое значение R'_p и $R_s = \text{var}$, получим аналогичное второе семейство, показанное на фиг. 81 пунктиром. При этом сопротивлении R'_p характеристики для $R_s = \text{var}$ будут пересекаться в точке C , лежащей на линии OA . Найдем уравнение для прямой OA , выразив механическую характеристику обычной связью M и n .

Естественная характеристика двигателя имеет вид

$$n = \frac{U_N - I_a R_a}{c \cdot \Phi} = \frac{U_N}{c \cdot \Phi} - \frac{I_a R_a}{c \cdot \Phi} = n_0 - \frac{I_a R_a}{c \cdot \Phi}.$$

Равенство (181) может быть переписано, как

$$c \cdot n \cdot \Phi = -I_a R_a$$

или

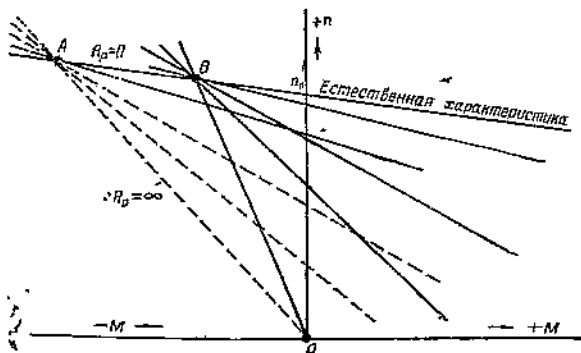
$$n = -\frac{I_a R_a}{c \cdot \Phi}.$$

Очевидно, что прямая OA параллельна естественной характеристике двигателя и проходит через начало координат. Она и является геометрическим местом точек пересечения семейств механических характеристик двигателя, построенных каждая при $R_p = \text{const}$ и $R_s = \text{var}$.

Рассмотрим теперь другой вариант семейств механических характеристик при $R_s = \text{const}$ и $R_p = \text{var}$ (фиг. 82). Это семейство будет иметь общую точку B . Последняя получится тогда, когда последовательное сопротивление не будет оказывать влияния на ток якоря. Это будет иметь место при условии, если машина будет посылать ток в шунтирующее сопротивление, а ток в последовательном сопротивлении будет равен нулю. При этом индуцированная э. д. с. за вычетом падения напряжения будет уравновешивать напряжение сети (фиг. 80).⁵

При этом

$$\begin{aligned} E - I_a R_a &= U_N, \\ I_a &= I_s. \end{aligned} \quad (182)$$



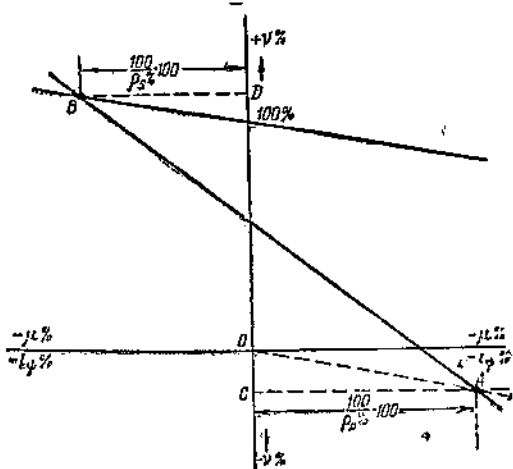
Фиг. 82. Семейство характеристик при $R_s = \text{const}$ и $R_p = \text{var}$.

Очевидно, что это может иметь место лишь при генераторной работе машины, т. е. при вращении со скоростью, большей n_0 . Заменяя в (182) E через $cn\Phi$ и U_N через $cn_0\Phi$, получим

$$n = n_0 + \frac{I_a R_a}{c \cdot \Phi}. \quad (183)$$

Выражение (183) представляет прямую, являющуюся продолжением механической двигательной характеристики и лежащую во втором квадранте, т. е. генераторную характеристику. При $R_p = 0$ мы получаем естественную характеристику, при $R_p = \infty$ мы получаем характеристику динамического торможения, проходящую через начало координат.

На фиг. 82 представлено пунктиром также второе семейство характеристик, при другом значении R_s'' и переменном значении R_p'' , пересекающееся в точке A . Естественная характеристика в своей



Фиг. 83. Построение для расчета сопротивлений в схеме с шунтированным якорем!

части, соответствующей генераторному режиму, является геометрическим местом точек пересечения указанных семейств.

Отсюда вытекает следующий способ расчета сопротивлений для этих характеристик (фиг. 83). Для нахождения величин сопротивлений строим в координатных осях $i\%$ и $v\%$ естественную характеристику двигателя и желаемую при шунтировке якоря. Через начало координат проводим прямую, параллельную естественной характеристике. Имеем две точки пересечения

$$I_p = 0; \quad I_a = I_s = \frac{U_N}{R_s}.$$

В точке A напряжение на щетках равно нулю

$$I_s = 0; \quad I_p = I_a = \frac{U_N}{R_p}.$$

Так как в шунтовом двигателе $\Phi = \text{const}$, то прямая момента будет в то же самое время и прямой тока якоря

$$i_{\psi a} \% = i \%.$$

Стало быть,

$$BD = i_{\psi a} \% = i_{\psi s} \% = \frac{U_N}{R_s} \cdot \frac{1}{I_N} \cdot 100 = \frac{R_N}{R_s} \cdot 100 = \frac{100}{\rho_s \%} \cdot 100, \quad (184)$$

т. е.

$$\rho_s \% = \frac{100}{i_{\psi a} \%} \cdot 100. \quad (184')$$

Соответственно

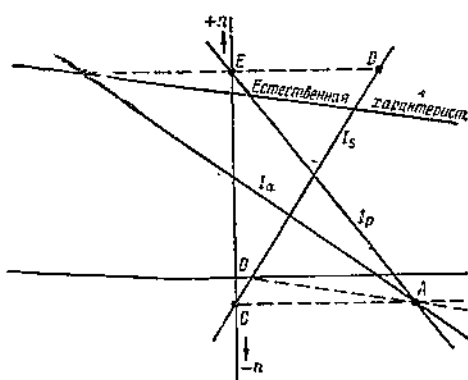
$$AC = i_{\psi a} \% = i_p \% = \frac{U_N}{K_p} \cdot \frac{1}{I_N} \cdot 100 = \frac{100}{\rho_p \%} \cdot 100, \quad (185)$$

откуда

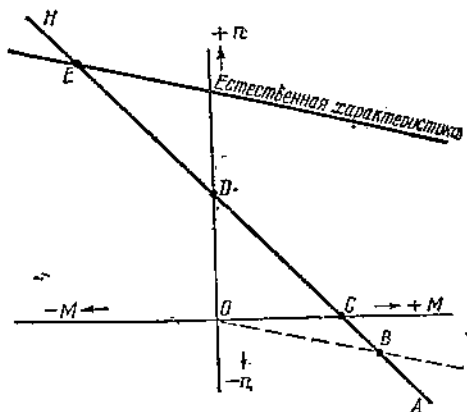
$$\rho_p \% = \frac{100}{i_{\psi a} \%} \cdot 100. \quad (185')$$

Рассмотрим законы изменения тока в последовательном и шунтирующем сопротивлении при работе по некоторой характеристике. Очевидно, что прямая $n=f(M)$ является в то же самое время и прямой $n=f(I_a)$.

При прямолинейном законе изменения якорного тока, токи I_s и I_p будут изменяться в функции скорости согласно равенствам (176) и



Фиг. 84. Построение кривых $I=f(n)$ для схемы с шунтированным якорем.



Фиг. 85. Пределы работы шунтовой машины с шунтированным якорем в разных режимах.

(177) также по прямой линии. Найдем две точки для каждой прямой (фиг. 84).

Как уже указано в точке B

$$I_s = I_a \text{ и } I_p = 0.$$

В свою очередь в точке A

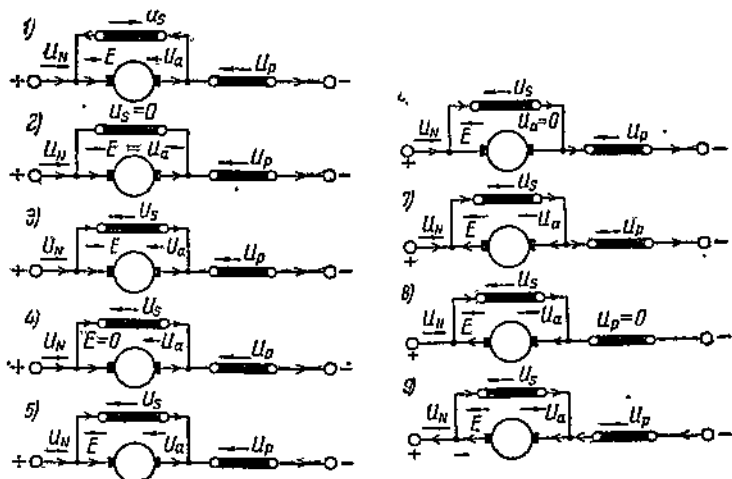
$$I_p = I_a \text{ и } I_s = 0.$$

Отсюда получаем для токов I_p и I_s прямые, показанные на фиг. 84.

Интересно отметить, что шунтовая машина с последовательным сопротивлением и шунтированным якорем в зависимости от точки

механической характеристики может работать в весьма разнообразных режимах (фиг. 85) [Л. 7]. Направления напряжения сети, э. д. с. и токов для разных случаев показаны на фиг. 86. На ней $I_a R_a$ обозначено U_a .

1. От точки *A* до точки *B* машина работает в режиме противозвключения, причем шунтирующий контур питается от двигателя.



Фиг. 86. Направление напряжений, э. д. с., падений напряжения и токов в разных участках характеристики фиг. 85.

2. В точке *B* имеется чистый режим противозвключения.
3. От точки *B* до точки *C* — режим противозвключения с питанием шунтирующего контура от сети.
4. В точке *C* машина работает как неподвижный тормоз.
5. От точки *C* до точки *D* имеется двигательный режим.
6. В точке *D* — идеальный холостой ход при пониженном на зажимах якоря напряжении.
7. От точки *D* до точки *E* — динамическое торможение с одновременной подачей энергии в шунтирующее сопротивление из сети.
8. В точке *E* чистый режим динамического торможения.
9. От точки *E* до точки *H* — режим рекуперации энергии в сеть с одновременной подпиткой шунтирующего сопротивления.

Практическое значение для электропривода в отношении получения низких (ползучих) скоростей имеет преимущественно лишь один двигательный режим.

34. Механические характеристики серийных двигателей постоянного тока

В серийном двигателе механическая характеристика $M=f(n)$ не поддается аналитическому выражению вследствие условий насыщения

$$M=c \cdot I \cdot \Phi=c \cdot I \cdot f(I).$$

Лишь при пренебрежении насыщением железа можно выразить M от n в виде гиперболы.

$$\text{При } \Phi \equiv I \quad I = c' \cdot \sqrt{M}.$$

Соответственно

$$n = \frac{U - IR}{c_1 \Phi} = \frac{U - IR}{c_2 \cdot I} = \frac{a}{I} - \delta = \frac{\gamma}{\sqrt{M}} - \delta. \quad (186)$$

Однако ненасыщенных машин в современной практике не строят. Действительные характеристики сильно разнятся от гиперболы. Практически принято и по существу совершенно необходимо механические характеристики серийного двигателя представлять графически. Так они и даются в соответствующих каталогах на двигатели. В каталогах приводятся графически зависимости скорости вращения и момента двигателя в функции от тока якоря для естественной характеристики. Исходя из нее, возможно построить характеристики для любой схемы включения серийного двигателя.

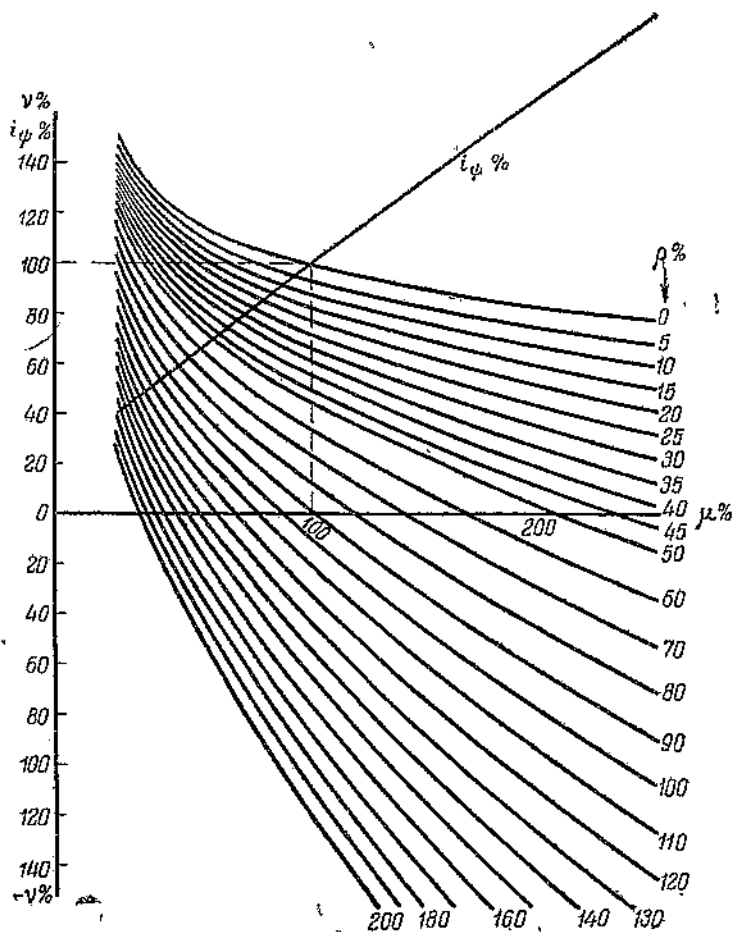
Прежде чем переходить к изложению методики построения характеристик, рассмотрим их вид в простых схемах включения, т. е. с последовательным введением сопротивления в цепь якоря. На фиг. 87 представлены естественная и искусственные характеристики двигателя типа КИД для двигательного режима и режима противовключения. Чем больше сопротивление, введенное последовательно в цепь якоря, тем ниже идет характеристика, ибо

$$n = \frac{U - IR}{c' \Phi}.$$

Важно отметить, что в отличие от шунтового двигателя серийный двигатель числа оборотов идеального холостого хода n_0 не имеет, так как в нем э. д. с. E никогда не может быть сделана равной напряжению U за счет тока из внешней сети. Здесь переход из режима двигателя в режим генератора только за счет увеличения скорости машины без переключения обмоток невозможен, ибо как бы мы близко ни приближали E к U , обратная э. д. с. никогда не сможет достигнуть приложенного напряжения. При бесконечно малой разности U и E намагничивающий машину якорный ток был бы бесконечно мал, а число оборотов машины бесконечно велико. Этим и объясняется то обстоятельство, что переход из двигательного режима в генераторный без переключения обмоток или без изменения направления вращения в серийном двигателе невозможен.

Но как и в шунтовом типе двигателя, мы имеем здесь плавный переход из двигательного режима в режим противовключения (электромагнитного тормоза). Такой режим получается тогда, когда двигатель будет вращаться рабочей машиной в сторону, обрат-

ную по сравнению с той, для которой произведено включение его обмоток. Например, при торможении спускающегося груза обмотки двигателя для создания тормозного действия включаются на подъем. Принципиально при этом включении возможны два режима работы серийной машины:

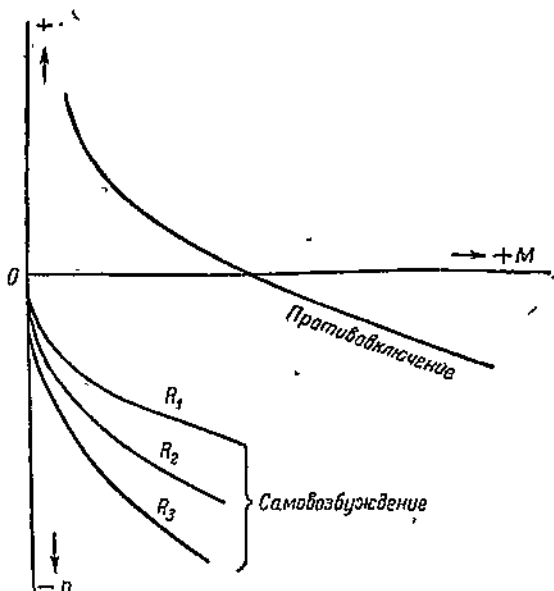


Фиг. 87. Механические характеристики серийного двигателя в нормальной схеме.

- 1) работа в режиме противовключения;
- 2) работа самовозбужденным генератором, ибо серийная машина при сохранении взаимного соединения обмоток для двигательного режима, но при изменении направления вращения, может перейти в режим генератора.

Механические характеристики машины в этом случае имели бы вид фиг. 88.

Работает ли машина в одном режиме или в другом, зависит всецело от скорости машины и величины сопротивления в цепи якоря. При больших сопротивлениях машина возбуждаться не может и работает в режиме противовключения. При малых добавочных сопротивлениях и высоких скоростях машины может самовозбудиться и начать работать самовозбужденным генератором. Этого режима мы в практических условиях допустить не можем вследствие невозможности параллельной работы шунтового генератора сети с серийным генератором из-за специфической внешней характеристики последнего. При тех сопротивлениях, которые вводятся в цепь якоря при противовключении для ограничения тока, самовозбуждение машины оказывается невозможным.



Фиг. 88. Механические характеристики самовозбуждения серийной машины.

В отдельных схемах применяют динамическое торможение серийной машины самовозбужденным генератором при работе на отдельное сопротивление. Характеристики при этом имеют вид кривых фиг. 88. Однако применение этой схемы практически ограничено по следующим причинам. При малых скоростях машина не возбуждается и не дает тормозного момента. При некоторой скорости происходит бурное самовозбуждение с ударом на исполнительный механизм. Если такую схему применить при торможении спускающегося груза, то сначала груз будет быстро падать, затем получится удар. Поэтому в современной практике подобная схема применяется редко.

Отсюда совершенно ясно, что метод противовключения должен находить и находит исключительно широкое распространение в схемах серийного двигателя.

35. Расчет механических характеристик серийного двигателя в нормальной схеме

Переходим к расчету характеристик серийного двигателя в простых схемах с введением добавочного сопротивления в цепь якоря. Для этой цели могут быть использованы два метода расчета: 1) метод пограничной характеристики; 2) метод переходной характеристики или использования величины э. д. с., приходящейся на скорость в один оборот в минуту ($\frac{E}{n}$).

Понятие пограничной характеристики введено в свое время Арнольдом и Ла-Куrom. Использование ее для расчета характеристик серийного двигателя дано проф. Ароновым. Второй метод разработан американцами.

Рассмотрим сначала первый метод.

Естественная характеристика двигателя $n=f(I)$, подчиняющаяся равенству

$$n = \frac{U_N - IR_a}{c_1 \Phi}, \quad (187)$$

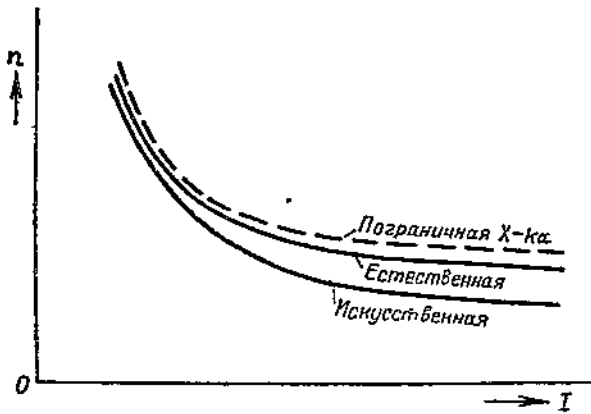
учитывает как влияние омического падения напряжения, так и реакцию якоря. Если бы $R_a = 0$, то мы имели бы зависимость

$$n_g = \frac{U_N}{c_1 \Phi}. \quad (188)$$

Назовем эту характеристику пограничной. Она легко может быть найдена и построена из соотношений (187) и (188)

$$n_g = n \cdot \frac{U_N}{U_N - IR_a}.$$

Эта характеристика показана на фиг. 89 пунктиром.



Фиг. 89. Естественная пограничная характеристика.

В том случае, когда в цепь якоря двигателя введено добавочное сопротивление R_d , скорость вращения подчиняется равенству

$$n = \frac{U_N - I(R_a + R_d)}{c_1 \Phi}$$

или с учетом (188).

$$n = \frac{U_N}{c_1 \Phi} - \frac{I(R_a + R_d)}{c_1 \Phi} = n_g - \frac{I(R_a + R_d)}{c_1 \Phi}.$$

Но

$$\Phi = \frac{U_N}{c_1 n_g}.$$

Следовательно,

$$n = n_g - \frac{I(R_a + R_d) \cdot n_g}{U_N} = n_g \left[1 - \frac{I(R_a + R_d)}{U_N} \right]. \quad (189)$$

По этому равенству и пограничной характеристике могут быть построены механические характеристики $n = f(I)$ серийного двигателя для любого тока и любого сопротивления. Далее они могут быть перестроены в зависимости $n = \varphi(M)$. Выражение (189) может быть написано для процента величин

$$\begin{aligned} \nu \% = \frac{n}{n_N} \cdot 100 \% &= \frac{n_g}{n_N} \cdot 100 \% \left[1 - \frac{I(R_a + R_d)}{I_N R_N} \cdot \frac{100 \cdot 100}{100 \cdot 100} \right] = \\ &= \nu_g \% \left(1 - \frac{i_\psi \% \cdot \rho \%}{100 \cdot 100} \right), \end{aligned} \quad (190)$$

или в относительных единицах

$$\nu = \nu_g (1 - i_\psi \rho). \quad (190')$$

Рассматривая равенства (189) или (190') для постоянного значения тока, а стало быть и $\Phi = \text{const}$, и разных сопротивлений $(R_a + R_d)$ и полагая, что $\frac{I_x}{U_N} = \alpha_x$, мы можем написать

$$n = n_g (1 - \alpha_x \cdot R). \quad (191)$$

Отсюда получаем простой способ нахождения точек различных характеристик при $I = \text{const}$ и $R = \text{var}$. Беря разные значения тока и находя соответствующие точки при разных сопротивлениях, получим точки для всех семейств. Такое семейство было представлено на фиг. 87.

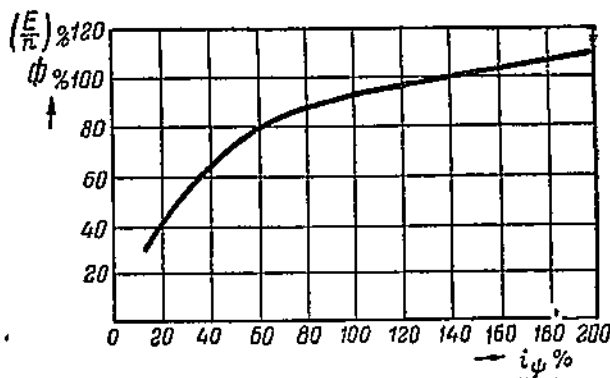
Второй метод, как уже указано, использует значение индуктированной в машине э. д. с., приходящееся при данном потоке, т. е. данном токе возбуждения, на один оборот в минуту. Американцы сокращенно называют это понятие «вольт на оборот» $\left(\frac{E}{n} \right)$.

Важность понятия «вольт на оборот» проистекает из того, что величина $\frac{E}{n}$ для данного значения потока, т. е. тока в якоре, равному в простой схеме току в обмотке возбуждения, будет оставаться постоянной, независимо от введенного в цепь якоря добавочного сопротивления.

Зависимость

$$\frac{E}{n} = c_1 \Phi = f(I) \quad (192)$$

представляет собой переходную характеристику. Такая переходная характеристика для двигателя типа КПД представлена на фиг. 90.



Фиг. 90. Характеристика $\frac{E}{n} = f(I)$ для двигателя типа КПД.

Эта кривая весьма близка к кривой намагничивания машины и отличается от последней лишь тем, что учитывает реакцию якоря, ибо Φ представляет действительный магнитный поток, а не поток, созданный одной обмоткой возбуждения Φ_p . Так как $\Phi < \Phi_p$, то указанная кривая идет несколько ниже кривой намагничивания.

Величина $\frac{E}{n}$ дает возможность простого подсчета скорости для любого сопротивления в цепи двигателя. При работе двигателя на естественной характеристике

$$E_e = c_1 \cdot \Phi_e \cdot n_e. \quad (193)$$

При работе на искусственной характеристике

$$E_u = c_1 \Phi_u \cdot n_u. \quad (194)$$

Вычисляя n_u для потока $\Phi_u = \Phi_e$, получим

$$n_u = \frac{E_u}{\left(\frac{E}{n}\right)_e}. \quad (195)$$

Это соотношение по существу аналогично (189) и может быть использовано для расчета. Введем предварительно соотношения, необходимые для расчета характеристик в процентах.

За 100% величины $\frac{E}{n}$ принимаем отношение $\frac{U_N}{n_N}$.

В свою очередь примем за 100% потока поток Φ_0 при U_N и n_N

$$c_1 \cdot \Phi_0 = \frac{U_N}{n_N}. \quad (196)$$

Так как $\frac{E}{n} = c_1 \Phi$ (192), то, деля равенство (192) на (196) и умножая обе части на 100, получим

$$\frac{\frac{E}{n}}{\frac{U_N}{n_N}} \cdot 100 = \frac{c_1 \cdot \Phi}{c_1 \cdot \Phi_0} \cdot 100 \quad (197)$$

или

$$\left(\frac{E}{n} \right) \% = \Phi \% , \quad (198)$$

т. е. проценты «вольт на оборот» при любом токе в обмотке возбуждения равны процентам потока.

Нужно иметь в виду, что в отличие от шунтового двигателя, где $\mu \% = i_\psi \%$ вследствие постоянства потока, в серийном двигателе

$$\text{при } I < I_N \quad \mu \% < i_\psi \%$$

$$\text{и при } I > I_N \quad \mu \% > i_\psi \%$$

Выразим величину $\left(\frac{E}{n} \right)$ в процентах через процентные значения E и n . В таком случае

$$\left(\frac{E}{n} \right) \% = \frac{\left(\frac{E}{n} \right)}{\frac{U_N}{n_N}} \cdot 100 = \frac{\frac{E}{n} \cdot 100}{\frac{n}{n_N} \cdot 100} \cdot 100 = \frac{e \%}{v \%} \cdot 100. \quad (199)$$

Равенство (195) соответственно может быть переписано в виде

$$v_u \% = \frac{e_u \%}{\left(\frac{E}{n} \right)_e \%} \cdot 100. \quad (200)$$

Соответственно для равновесия э. д. с. в цепи якоря можно написать

$$E_a = U_N - I_a(R_a + R_d).$$

Выражая это равенство в процентных величинах, получим

$$\frac{E_a}{U_N} \cdot 100 = 1 \cdot 100 - \frac{I_a(R_a + R_d)}{R_N I_N} \cdot 100$$

или

$$\varepsilon_n \% = 100 - \frac{i_\psi \% \cdot \rho \%}{100}. \quad (201)$$

Соответственно для $\left(\frac{E}{n}\right) \%$ можно получить

$$\left(\frac{E}{n}\right)_e \% \frac{\varepsilon_e \%}{\nu_e \%} \cdot 100 = \frac{100 - \frac{1}{100} i_\psi \% \cdot \rho \%}{\nu_e \%}. \quad (202)$$

Расчет искусственных характеристик $\nu_n \% = f(\mu \%)$ производится следующим образом.

По заданным каталогами кривым $\nu \% = f(i_\psi \%)$ и $\mu \% = f(i_\psi \%)$ строим естественную механическую характеристику $\nu \% = f(\mu \%)$.

Далее по равенству (199) находим $\left(\frac{E}{n}\right) \%$, наконец, по равенству (200) определяем $\nu_n \%$. Подобные расчеты проводятся в табл. V, приведенной ниже, как для абсолютных так и процентных относительных величин. Для проведения их необходимо значение величины омического сопротивления обмотки якоря.

36. Механические характеристики серийного двигателя сложных схемах с шунтировкой якоря и обмотки возбуждения

Практические весьма разнообразные условия работы электроприводов требуют и от серийных двигателей значительно большего разнообразия характеристик, чем это дается простой схемой с последовательно включенными сопротивлениями.

Такие характеристики требуются для получения ползучих скоростей, для ограничения возможности разгона при отрицательных статических моментах, для получения более высоких скоростей, чем получается по естественной характеристике, и т. д. Все эти задачи решаются сложными схемами с шунтировкой якоря и обмотки возбуждения.

Таблица V

Расчет искусственных механических характеристик серийного двигателя по постоянному току в процентах и абсолютных величинах при добавочных последовательных сопротивлениях в цепи якоря

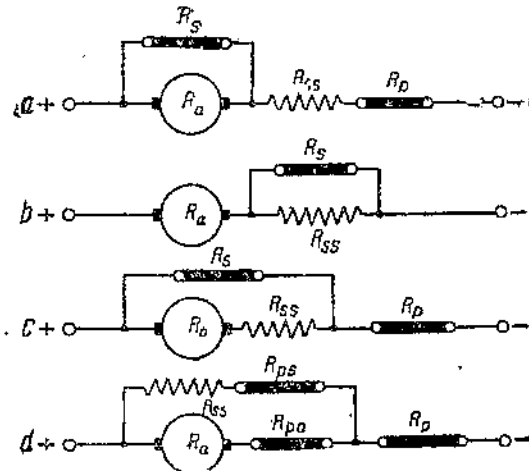
Исходные данные		Промежуточные данные			Данные искусственной характеристики	
$i_{\psi}^{\circ}/\%$	задано $R_a^{\circ}/\%$	$\frac{i_{\psi}^{\circ}/\% \cdot R_a^{\circ}/\%}{100}$	$\varepsilon^{\circ}/\%$	$\left(\frac{E}{n}\right)^{\circ}/\%$	задано $(R_a + R_d)^{\circ}/\%$	
	$\mu^{\circ}/\%$				$\gamma_u^{\circ}/\%$	$\frac{i_{\psi}^{\circ}/\% \cdot R_a^{\circ}/\%}{100}$
Задаем		S	$100 - S$	$\frac{\varepsilon_u^{\circ}/\%}{\gamma_u^{\circ}/\%} \cdot 100$	$100 - Q$	$\frac{\varepsilon_u^{\circ}/\%}{\left(\frac{E}{n}\right)^{\circ}/\%} \cdot 100$
Задаем R_a		$\frac{IR_a}{V}$	$\frac{E}{V}$	$\left(\frac{E}{n}\right)^{\circ}$	Задано $(R_a + R_d)$	
I А	M кгм				n об/мин	IR V
Задаем		IR_a	$U_N - IR_a$	$\left(\frac{E}{n}\right)^{\circ}$	IR	$\frac{E_u}{\left(\frac{E}{n}\right)^{\circ}}$
		Находится из кривых		Находится из кривых		

В процентных величинах

В абсолютных величинах

Принципиально возможны следующие схемы включения серийного двигателя (фиг. 91):

- 1) шунтировка обмотки якоря при последовательном сопротивлении в цепи (фиг. 91a);
- 2) шунтировка обмотки возбуждения (фиг. 91b);
- 3) совместная шунтировка цепи якоря и обмотки возбуждения с последовательным сопротивлением (фиг. 91c);



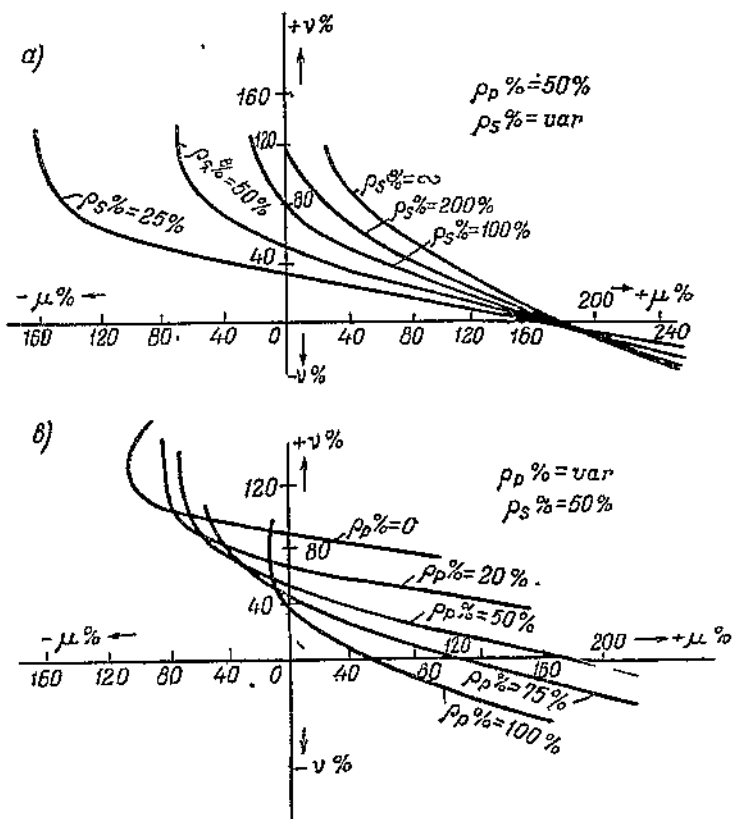
Фиг. 91. Возможные схемы включения серийного двигателя с шунтировкой якоря и обмотки возбуждения.

Из особенностей схем включения ясно, что во 2-й и 3-й схемах машина попрежнему сохраняет серийные характеристики, так как в этих схемах поток изменяется в полном соответствии с током якоря. В схемах 1-й и 4-й через обмотку возбуждения проходит ток, частично не зависящий от тока якоря, машина частично становится шунтовой и приобретает некоторые комбинированные характеристики. Принципиально расчет нужно делать на основании уравнений Кирхгофа для рассматриваемой схемы, как и в шунтовой машине [равенства (173) — (175)] с учетом особенностей изменения магнитного потока.

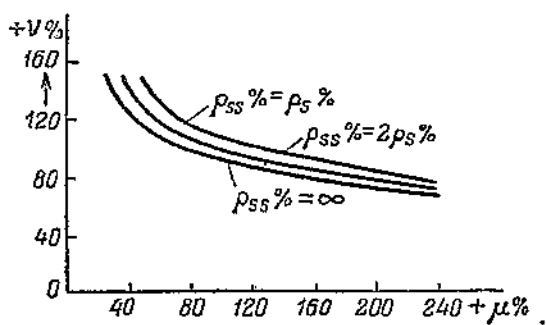
Форма характеристик для всех четырех случаев иллюстрируется кривыми фиг. 92—95. Изменение относительных величин сопротивлений влияет на форму характеристик, и вообще серийный двигатель в сложных схемах может иметь бесчисленное множество механических характеристик.

Практический расчет этих характеристик возможен лишь с использованием переходной характеристики, т. е. отношения $\left(\frac{E}{n}\right)$.

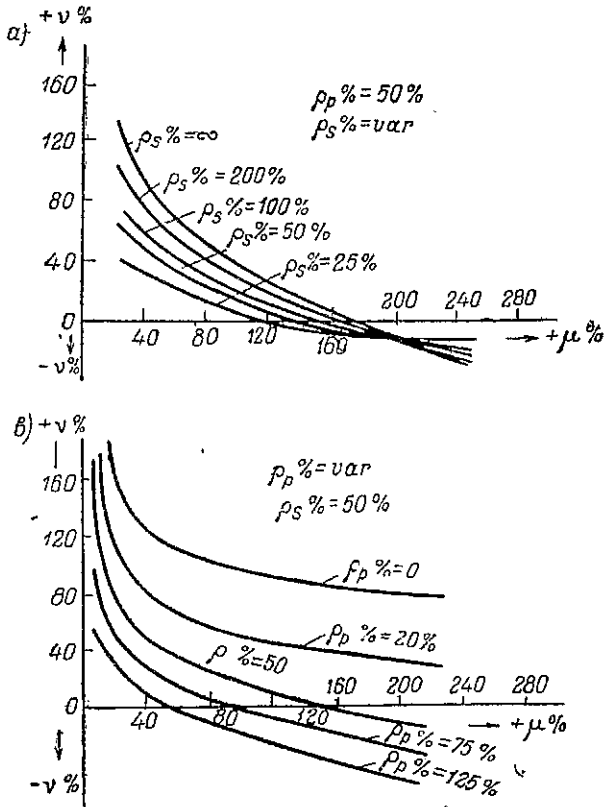
Расчет этот здесь принципиально несколько сложнее, чем в простых схемах, вследствие неравенства тока якоря и тока возбуждения. Во всех случаях нужно составить три уравнения аналогично равенствам (173) — (175) для шунтового двигателя и решить их с учетом действительного изменения э. д. с. Однако здесь кроме кривой $\left(\frac{E}{n}\right)$ оказывается целесообразно по методу



Фиг. 92. Механические характеристики серийного двигателя при шунтированном якоре.



Фиг. 93. Механические характеристики серийного двигателя при шунтированной обмотке возбуждения.



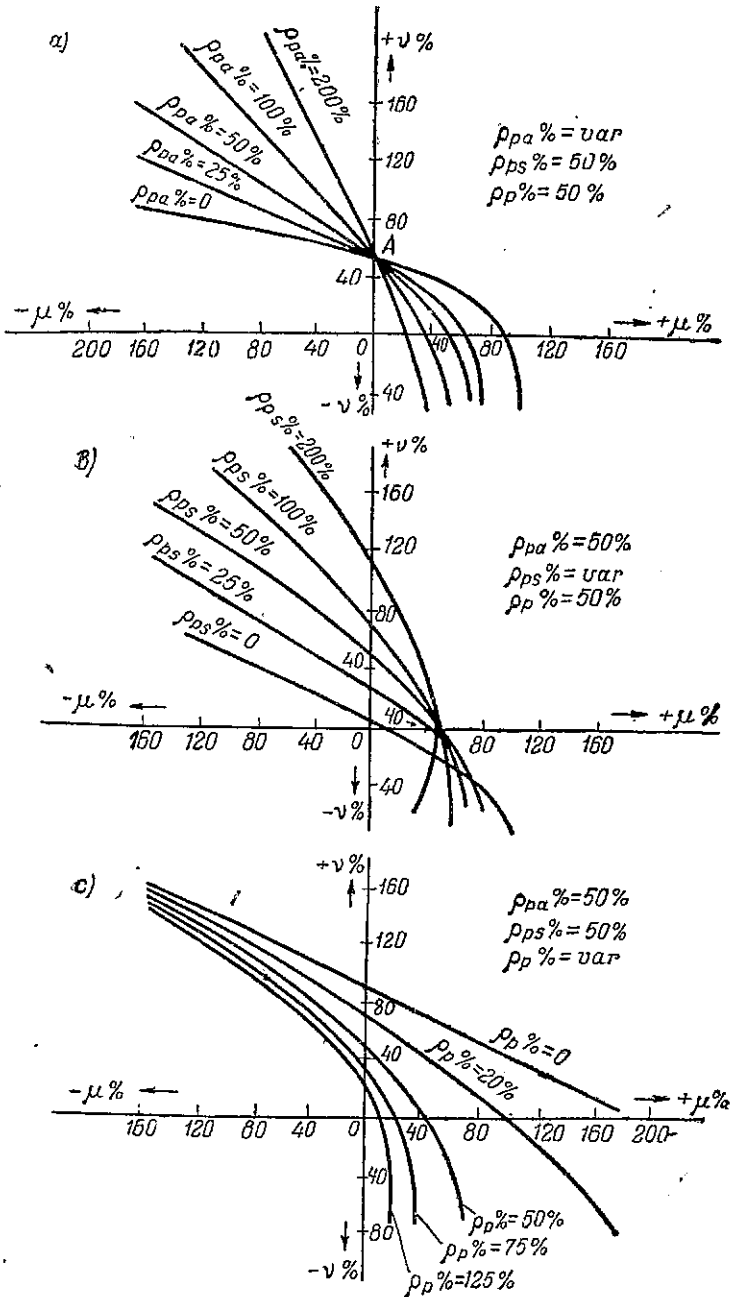
Фиг. 94. Механические характеристики серийного двигателя при шунтированном двигателе.

Мерилл'я [Л. 56] строить также кривую $\frac{M}{I_a} = \varphi(I_s)$, где I_s — ток возбуждения. Очевидно, что такая кривая будет пригодна для любых соотношений тока якоря и тока возбуждения. Кривые $\left(\frac{E}{n}\right)$ и $\left(\frac{M}{I}\right)$ показаны на фиг. 96.

Способ вычисления кривой $\frac{M}{I_a}$ пояснений не требует.

Методика расчета сводится к следующему [Л. 50, 56 и 57]. Составляем три уравнения, характеризующие равновесие э. д. с. токов.

Задаемся необходимым значением M при некотором n и током в серийной обмотке. Используя написанные равенства, находим E и $\left(\frac{E}{n}\right)$. Далее при заданных значениях R_p , R_r находим соответствующее значение n .



Фиг. 95. Механические характеристики при параллельном включении якоря и серийной обмотки возбуждения.

Методика расчета в абсолютных единицах и процентных значениях для случая схемы фиг. 91d и для характеристик фиг. 95 приведена в табл. VI.

Способы расчета для всех других режимов и описание происходящих при этом физических процессов можно найти в [Л. 7. 56, 57].

Коснемся кратко лишь некоторых физических свойств приведенных семейств механических характеристик.

Начнем с характеристик фиг. 93, относящихся к шунтировке обмотки возбуждения (схема фиг. 91b). Здесь характеристики сохраняют серийный характер, однако идут выше естественной характеристики (при $R_s = \infty$) за счет уменьшения магнитного потока. Никаких других особенностей эти характеристики не имеют. Используются они в том случае, когда требуется повышение скорости привода на определенный период работы исполнительного механизма.

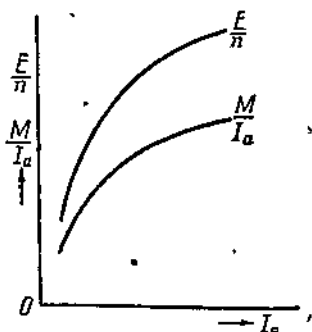
Характеристики фиг. 92 в схеме с шунтировкой якоря (фиг. 91a) получают число оборотов идеального холостого хода и тем самым имеют кроме двигательного генераторный режим. Это происходит вследствие того, что машина во всех случаях частично намагничивается шунтовым током. При $I_a = 0$ через серийную обмотку проходит при этом ток $I_s = I_p$. Очевидно, что этот ток будет тем больше, чем меньше R_p ,

$$I_s = I_p = \frac{U_N}{R_s + R_p}.$$

Сопrotивление R_p включает сопротивление серийной обмотки. Поэтому при уменьшении R_p поток увеличивается, и число оборотов в минуту идеального холостого хода снижается.

В тормозном (генераторном) режиме при повышении скорости (фиг. 92) машина может достигать опрокидывающего момента; как и асинхронный двигатель. Это происходит вследствие роста э. д. с. с повышением скорости. Рост э. д. с. вызывает уменьшение тока в последовательном сопротивлении и в серийной обмотке, и машина дает в дальнейшем снижение вращающего момента. Подобные схемы применяются иногда при спуске легких грузов во избежание разноса. Если бы при этом момент груза оказался больше опрокидывающего момента, то груз мог бы начать падать с недопустимой скоростью.

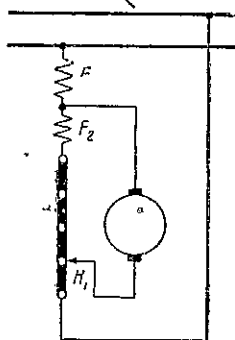
Характеристики фиг. 92 при $R_p = \text{const}$ и $R_s = \text{var}$ в режиме противоключения пересекаются в одной точке по той же причине, как и характеристики шунтовой машины (фиг. 81).



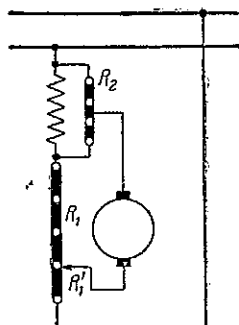
Фиг. 96. Кривые $\left(\frac{E}{n}\right)$ и $\left(\frac{M}{I}\right)$ для серийного двигателя.

Характеристики шунтированной машины (фиг. 91с), показанные на фиг. 94, каких-либо особенностей в форме не имеют, машина целиком остается серийной с влиянием падений в шунтовом и серийном сопротивлениях.

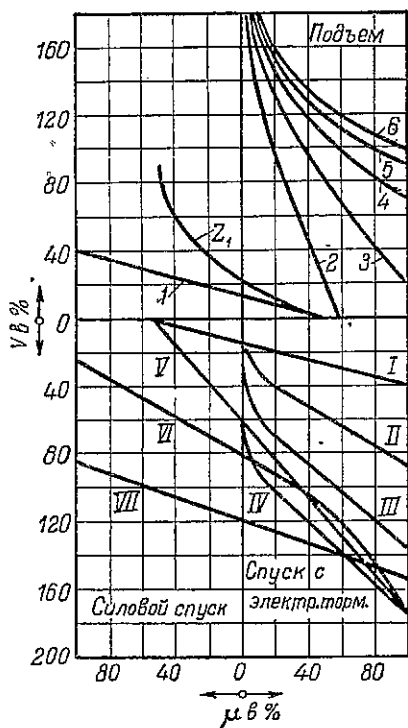
Совершенно своеобразны характеристики фиг. 95 схемы фиг. 91d. Пересечение всех кривых в точке А. фиг. 95а обусловлено



Фиг. 97. Схема Вейлера.



Фиг. 98. Схема Наталиса.



Фиг. 99. Тормозные характеристики для схемы Вейлера.

тем, что при $I_a = 0$, т. е. при переходе из двигательного режима в генераторный, ток в серийной обмотке для всех характеристик имеет одно и то же значение.

Отметим, что в целях получения желательных характеристик Weiler'ом и Natalis'ом были предложены схемы с делением обмотки возбуждения на две части (фиг. 97 и 98), при этом схема Вейлера дает прямое деление, но требует третьего вывода от обмотки возбуждения. Схема Наталиса дает косвенное деление. К числу преимуществ этих схем относится меньшее потребление энергии по сравнению с предыдущими схемами. У нас в СССР эти схемы применения не нашли. Тормозные характеристики одной из этих схем вместе с двигательными представлены на фиг. 99.

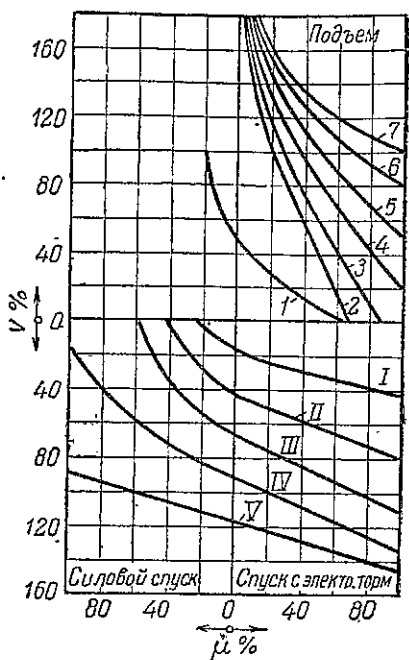
37. Составление комбинации механических характеристик схем управления электроприводом

Каждая схема управления электроприводом должна: 1) учитывать условия пуска и иметь соответствующее количество ступеней сопротивления, каждую со своей собственной механической характеристикой; 2) учитывать условия торможения и иметь соответствующее количество тормозных ступеней (характеристик). Количество необходимых ступеней (а следовательно, соответствующее им количество характеристик) выбирается в зависимости от требуемых условий в отношении отдельных скоростей, плавности пуска, торможения и т. д.

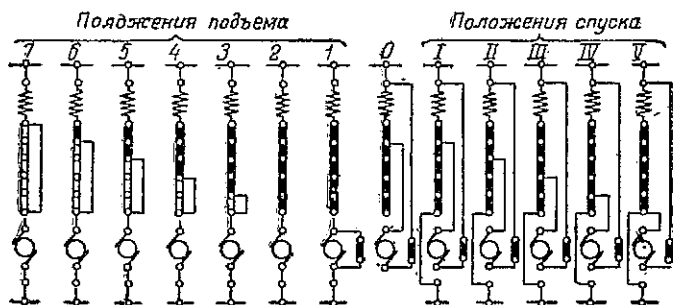
Число ступеней определяется из условий работы привода и устанавливается расчетом. Вся необходимая комбинация характеристик фиксируется диаграммой. Так на фиг. 100 показана диаграмма характеристик для последовательности включения подъемного двигателя крана по схеме фиг. 101.

Левая часть схемы показывает последовательное выключение пусковых сопротивлений, чему соответствуют механические характеристики в первом квадранте.

В правой части фиг. 101 показаны положения спуска в схемах с параллельным включением якоря и обмотки возбуждения.



Фиг. 100. Диаграмма механических характеристик электропривода постоянного тока (фиг. 101).

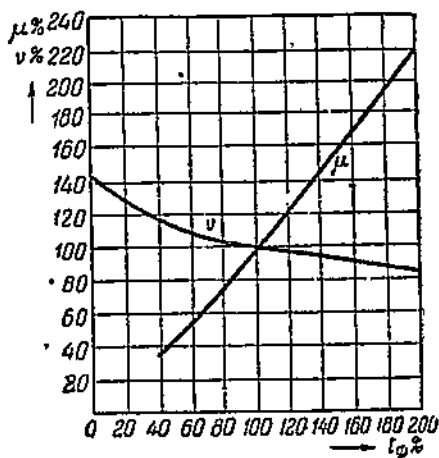


Фиг. 101. Последовательность переключения кранового подъемного двигателя в соответствии с диаграммой фиг. 100.

Переход вправо соответствует постепенному повышению скорости. Это соответствует характеристикам в третьем и четвертом квадрантах фиг. 100. В зависимости от веса груза мы можем работать при том или другом включении схемы. При этом при низких скоростях получается двигательный режим, при высоких — генераторный. Схема сама устанавливает в зависимости от веса груза — генераторный или двигательный режим, предупреждая возможность разноса. Требуемые схемой фиг. 101 и другими схемами переключения могут выполняться или ручными аппаратами — контроллерами или автоматическими аппаратами — так называемыми магнитными станциями или станциями управления, представляющими панели с смонтированными на них автоматическими переключателями — реле и контакторами.

38. Механические характеристики компаундных двигателей постоянного тока

В компаундном двигателе, где магнитный поток возбуждения создается совместным действием ампервитков шунтовой и серийной обмоток, механические характеристики, так же как и в серийном



Фиг. 102. Универсальная механическая характеристика компаундного двигателя типа КПД.

ном двигателе, аналитически выражены быть не могут и представляются графически. Общий вид этих характеристик зависит от соотношения ампервитков серийной и шунтовой обмоток. Наиболее часто встречающееся соотношение в двигателях повторно-кратковременного режима — это равенство ампервитков шунтовой и серийной обмоток при номинальном токе, соответствующем продолжительности включения 25%. Универсальная естественная механическая характеристика компаундного двигателя типа КПД, изготовленного заводом «Динамо», представлена на фиг. 102.

Скорость холостого хода этих двигателей ограничена ампервитками шунтовой обмотки. При больших нагрузках кривая идет полого вследствие насыщения, уменьшение скорости получается почти исключительно за счет омического падения напряжения.

Расчет механических характеристик компаундных двигателей ведется так же, как и серийных двигателей, с использованием

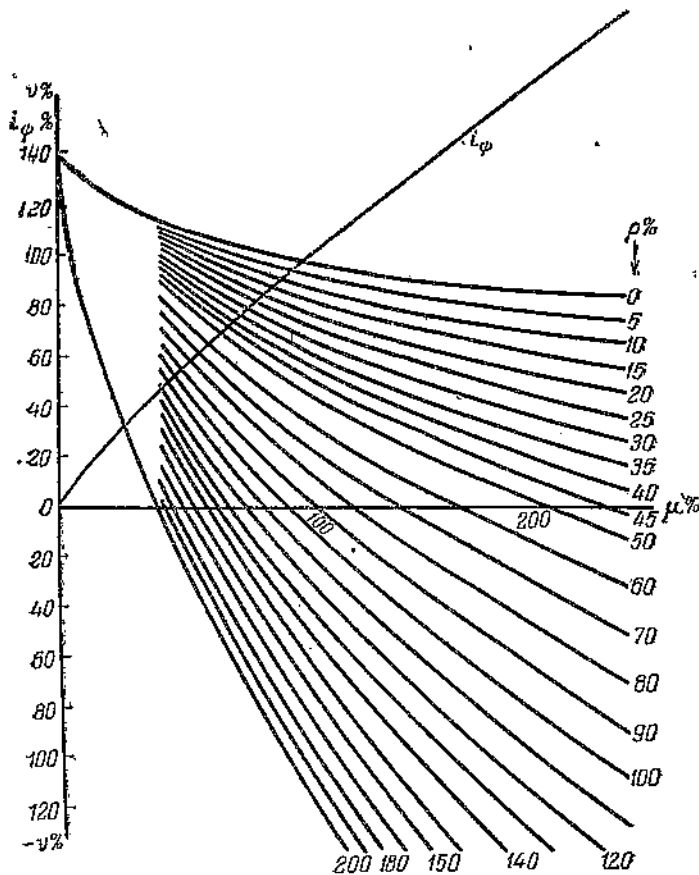
величины $\left(\frac{E}{n}\right)$. Здесь при $I_a=0$, $\frac{E}{n} \neq 0$, но имеет большое значение за счет потока шунтовой обмотки. Это значение при $I_a=0$, при $E=U_N$ и при $n=n_0$ будет

$$\left(\frac{E}{n}\right) = \frac{U_N}{n_0}.$$

В процентах

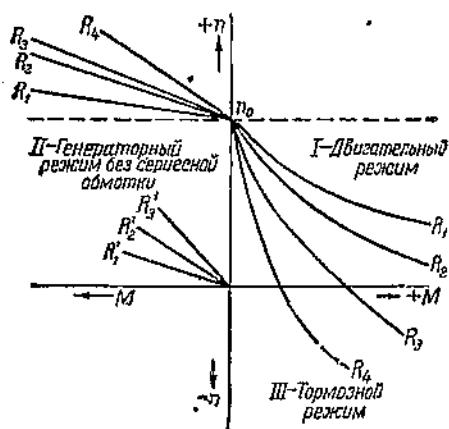
$$\left(\frac{E}{n}\right)\% = \frac{100}{v_n\%} \cdot 100. \quad (203)$$

Искусственные механические характеристики компаундного двигателя представлены для двигателей типа КПД мощности от 20 до 150 кВт для разных последовательно введенных сопротивлений в цепь якоря на фиг. 103.



Фиг. 103. Искусственные механические характеристики компаундного двигателя типа КПД.

Для торможения компаундных двигателей практически используются два метода: 1) противовключение и 2) динамическое торможение. Рекуперация энергии применяется сравнительно редко. При переходе через число оборотов идеального холостого хода n_0



Фиг. 104. Переход в генераторный режим с закороченной серийной обмоткой возбуждения.

ток в якоре и в серийной обмотке меняет свой знак и начинает размагничивать машину. Вместо того чтобы при скорости выше n_0 переключать серийную обмотку, в целях уменьшения аппаратуры, ее предпочитают закорачивать. Характеристика превращается в шунтовую и приобретает вид, показанный на фиг. 104.

Такое же влияние будет оказывать серийная обмотка и при динамическом торможении. Для экономии в аппаратуре предпочитают проводить динамическое торможение машины, как шунтовой с соответствующим видом характеристики.

Машины постоянного тока с встречным включением шунтовой и серийной обмоток на практике хотя и применяются, но сравнительно редко. Об особенностях их работы будет сказано несколько позже.

39. Механические характеристики асинхронных двигателей

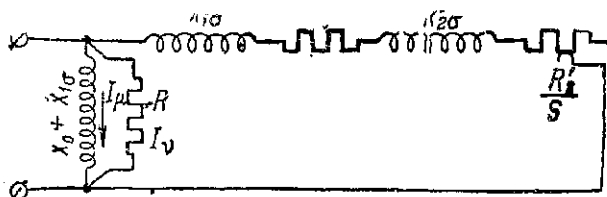
Выражение для вращающего момента асинхронного двигателя дается обычно в зависимости от скольжения s , а не скорости вращения n . Оно может быть выведено из эквивалентной схемы двигателя. Сложность явлений, имеющих место в асинхронных машинах, повела к использованию различных эквивалентных схем и разных круговых диаграмм. При этом отдельные авторы стремятся учесть насыщение и влияние переменных параметров. По данным завода «Электросила» для учета насыщения расчетный ток короткого замыкания должен быть увеличен в 1,2—1,3 раза по сравнению с ненасыщенной машиной в случае паза обычной конфигурации и в 1,5—1,6 раза для утопленных пазов с узкой щелью. С учетом указанных уточнений круговая диаграмма может с достаточной для практики точностью отразить действительные физические процессы, происходящие в машине.

Однако инженеры, проектирующие электропривод, обычно не имеют данных, необходимых для построения круговой диаграммы. Вместе с тем для решения задач электропривода желательно иметь

аналитическое выражение для зависимости момента двигателя от скорости.

Общий подход к этому вопросу (классическая теория асинхронной машины) никак не может учесть всех особенностей различных типов двигателей, в особенности короткозамкнутых и в частности с глубоким пазом и Бушера, т. е. двигателей с переменными параметрами ротора.

Поэтому мы вынуждены сначала рассмотреть относительно более простые механические характеристики двигателей с кольца-



Фиг. 105. Упрощенная эквивалентная схема асинхронного двигателя.

ми, а затем уже коснуться более сложных по физическим процессам двигателей короткозамкнутых.

Учитывать в вопросах динамики электропривода изменение намагничивающего тока двигателя от нагрузки, а также вызываемое им падение напряжения практически почти невозможно. Далее в общем случае приходится предполагать постоянство активных и реактивных сопротивлений ротора, пренебрегать влиянием изменения магнитной проницаемости под влиянием нагрузки и явлением поверхностного эффекта в проводниках обмотки. Тем самым мы будем базироваться не на так называемой «точной», а на упрощенной эквивалентной схеме фиг. 105, где U_{M1} — первичное подведенное напряжение, принимаемое постоянным; x_1 , R_1 , $x'_{2\sigma}$, $\frac{R_2}{s}$ — соответственно первичные и приведенные вторичные реактивные и активные сопротивления. В схеме фиг. 105 намагничивающий контур вынесен на зажимы двигателя. Для учета падения напряжения от намагничивающего тока $I_{1\mu}$ в первичном реактивном сопротивлении $x_{1\sigma}$ величина x_0 в намагничивающем контуре увеличена на величину $x_{1\sigma}$, учитывающую падение напряжения от намагничивающего тока в первичном реактивном сопротивлении рассеяния при холостом ходе. Ток I_2 и величина R учитывают потери в железе.

В указанной схеме приведенный вторичный ток [Л. 59]

$$I_2 = \frac{U_d}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + x_{\sigma}^2}}, \quad (204)$$

где

$$U_d = U_{M1} - x_{\sigma 1} \cdot I_{1\mu}, \quad \text{а} \quad x_{\sigma} = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}.$$

Мощность, передаваемая статором ротору, как известно, равна

$$P_i = \frac{m_2 \cdot R'_2 \cdot I_2^2}{s}, \quad (205)$$

где m_2 — число фаз вторичной системы, а s — скольжение.

Подставляя в (205) значение I_2 , а также учитывая, что потребляемая мощность в этой схеме характеризуется произведением активного тока на U_{N1} , а не на U_d , получим внутреннюю мощность, пропорциональную вращающему моменту, при числе фаз первичной системы m_1 .

$$P_i = \frac{U_{N1}}{U_d} \cdot \frac{m_1 \cdot U_d^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_\sigma^2} = \frac{m_1 \cdot U_{N1} \cdot U_d \cdot \frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_\sigma^2} = \frac{m_1 \cdot U_{N1} \cdot U_d \cdot s \cdot R'_2}{(sR_1 + R'_2)^2 + (sx_\sigma)^2}, \quad (206)$$

Соответственно внутренняя опрокидывающая мощность

$$P_m = \frac{m_1 \cdot U_{N1} \cdot U_d}{2(R_1 \pm \sqrt{x_\sigma^2 + R_1^2})}. \quad (207)$$

В равенстве (207) знак $+$ относится к двигательному режиму, знак $-$ к генераторному. Из этого равенства видно, что при значительном активном сопротивлении опрокидывающий момент в генераторном режиме сильно возрастает и может достигать больших значений.

Так называемое опрокидывающее скольжение, соответствующее опрокидывающей мощности,

$$s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + x_\sigma^2}}, \quad (208)$$

где знак $-$ соответствует генераторному режиму.

Беря отношение $P_i:P_m$, равное отношению соответствующих моментов, получим

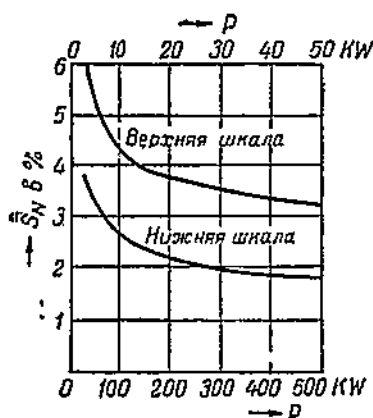
$$\frac{P_i}{P_m} = \frac{M_i}{M_m} = \frac{2sR'_2(R_1 \pm \sqrt{x_\sigma^2 + R_1^2})}{(sR_1 + R'_2)^2 + (sx_\sigma)^2}.$$

Деля числитель и знаменатель на величину $sR'_2 \cdot \sqrt{R_1^2 + x_\sigma^2}$ и учитывая равенство (208), получим

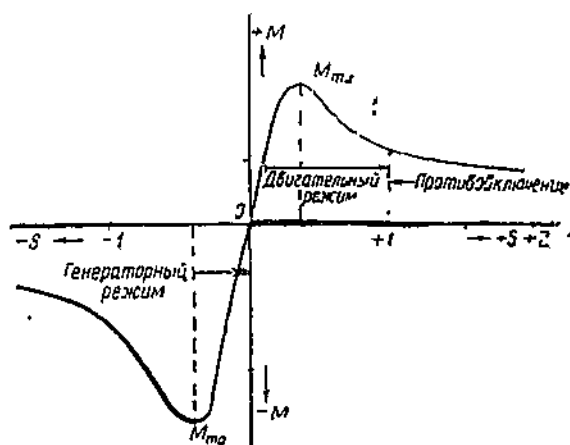
$$\frac{M_i}{M_m} = \frac{2(1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} \pm 2\varepsilon}, \quad (209)$$

где $\varepsilon = |s_m| \frac{R_1}{R'_2} = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + x_\sigma^2}} \approx \frac{R_1}{x_\sigma}$. (210)

Таково общее выражение момента асинхронного двигателя для двигательного и генераторного режима. При этом нужно иметь в виду, что опрокидывающий момент согласно равенству (207) для генераторного режима больше, чем для двигательного. Согласно ОСТ 7341 перегрузочная способность для двигателей с синхронным числом оборотов в минуту 1500 и 1000 должна быть не меньше 1,8, для двигателей с синхронной скоростью вращения 750 об/мин не ниже 1,6. Величина ϵ ориентировочно может приниматься равной $5s_N$. Значения s_N для двигателей разной мощности на $2p=4$ приведены на фиг. 106. Механическая характеристика асинхронного двигателя для двигательного (при $0 < s \leq 1$), генераторного (при $s < 0$) и режима электромагнитного тормоза (противовключения) при $s > 1$ представлена на фиг. 107.



Фиг. 106. Значение номинального скольжения для асинхронных двигателей разной мощности.



Фиг. 107. Механическая характеристика асинхронных двигателей.

Очевидно, что отношение опрокидывающих генераторного M_{mg} и двигательного M_{md} моментов будет равно

$$\frac{M_{mg}}{M_{md}} = \frac{R_1 + \sqrt{x_0^2 + R_1^2}}{R_1 - \sqrt{x_0^2 + R_1^2}} \quad (211)$$

Уравнение (210) выведено было в свое время Клоссом [Л. 58], почему и носит его имя.

Для дальнейшего использования равенства (209) в уравнениях движения привода его целесообразно выразить в относительных единицах. За масштаб в данном случае оказывается удобным принимать: для s — опрокидывающее скольжение s_m , для M — опрокидывающий момент M_m .

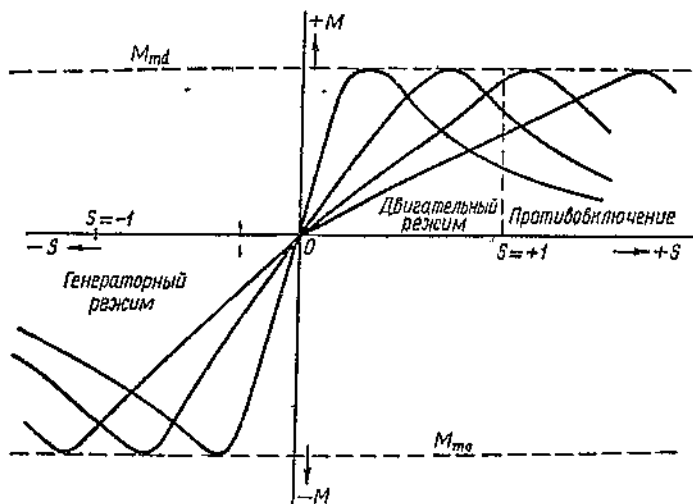
При этом уравнение (209) получает вид в относительных единицах

$$\mu = \frac{2(1+\varepsilon)}{\sigma + \frac{1}{\sigma} \pm 2\varepsilon} = 2(1+\varepsilon) \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 \pm 2\varepsilon\sigma + 1} \quad (212)$$

или в процентных величинах

$$\mu \% = 2(1+\varepsilon) \cdot \frac{\sigma \%}{\sigma^2 \pm 2\varepsilon\sigma + 1} = 2(1+\varepsilon) \cdot \frac{\sigma \%}{\frac{(\sigma \%)^2}{100^2} \pm 2\varepsilon \frac{\sigma \%}{100} + 1} \quad (212')$$

Как известно, опрокидывающий момент асинхронного двигателя не зависит от активного сопротивления ротора R'_2 . Изменение этого сопротивления производит лишь смещение максимума кривой момента. Разные значения сопротивления R'_2 дают семейство характеристик, представленных на фиг. 108.



Фиг. 108. Механические характеристики асинхронного двигателя при разных сопротивлениях в цепи ротора.

В том случае, когда мы имеем дело с мощными двигателями и оказывается возможным пренебречь величиной R_1 , т. е. положить $R_1 = 0$, а стало быть, и ε равными нулю, равенство (209) для двигательного режима превращается в (213)

$$\frac{M_s}{M_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (213)$$

Это уравнение носит название упрощенного уравнения Клосса.

В этом случае

$$s_m = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + x_{\sigma}^2}} \approx \frac{R'_2}{x_{\sigma}}$$

при

$$x_{\sigma 1} = x'_{\sigma 2} \quad s_m = \frac{R'_2}{2x_{\sigma 2}}$$

В том случае, если мы исходим из постоянного потока взаимоиנדукции, как известно, получается отношение

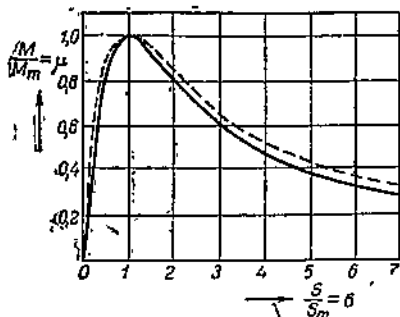
$$s_m = \frac{R'_2}{x'_{\sigma 2}}$$

так как при этом мы регулируем напряжение и тем самым исключаем влияние $x_{\sigma 1}$. Ошибка, получающаяся в случае равенства (213), при двигательном режиме будет тем больше, чем больше $\frac{s}{s_m}$ или $\frac{s_m}{s}$ разнятся от единицы. Для предельных случаев $\frac{s}{s_m} = 0$ и $\frac{s}{s_m} = \infty$ относительная ошибка равна ϵ . Для генераторного режима наибольшая относительная ошибка получается при $\frac{s}{s_m} = -1$ и имеет величину примерно 2ϵ .

На фиг. 109 приведены в зависимости от $\frac{s}{s_m}$ отношения внутренней мощности к опрокидывающей для случая $R_1 = 0$ (сплошная кривая) и при $R_1 = 0,25x_{\sigma}$ (пунктирная кривая). Ошибка при $\frac{s}{s_m} = 7$ достигает почти 20%. Вот почему там, где необходима большая точность, следует пользоваться полным уравнением Клосса.

Полагать $R_1 = 0$ и, следовательно, пользоваться упрощенной формулой Клосса (213) можно лишь от холостого хода до полной нагрузки. В этих пределах изменение первичной э. д. с. E_1 невелико и составляет всего около 2%. Только в этом случае можно пользоваться эквивалентной схемой фиг. 105 и не учитывать падение напряжения в R_1 от намагничивающего тока.

Условия работы при постоянном потоке взаимоиנדукции статорной и роторной обмотки ($E_1 = \text{const}$) и при постоянном первичном напряжении ($U_{M1} = \text{const}$) оказываются практически эквивалентными.



Фиг. 109. Внутренняя мощность двигателя в функции отношения скольжения к опрокидывающему скольжению.

Заметим, что в каталогах на двигатели, к сожалению, обычно не дается величина опрокидывающего скольжения. Ее приходится определять по следующим отношениям, исходя из перегрузки λ_M , даваемой в каталогах.

Согласно равенству (209) для двигательного режима

$$\frac{M_m}{M_N} = \frac{\frac{s_N}{s_m} + \frac{s_m}{s_N} + 2\varepsilon}{2(1+\varepsilon)} = \lambda_M. \quad (214)$$

Отсюда находим

$$\frac{s_N}{s_m} = \frac{1}{[\lambda_M + (\lambda_M - 1)\varepsilon] + \sqrt{[\lambda_M + (\lambda_M - 1)\varepsilon]^2 - 1}}. \quad (215)$$

В двигателях большой мощности с малым ε для приближенных подсчетов можно пользоваться упрощенными равенствами

$$\lambda_M = \frac{\frac{s_N}{s_m} + \frac{s_m}{s_M}}{2} \quad (216)$$

или

$$\frac{s_N}{s_m} = \lambda_M - \sqrt{\lambda_M^2 - 1} = \frac{1}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}}. \quad (217)$$

Формула (216) дает ошибку для λ_M равную $\frac{\varepsilon(\lambda_M - 1)}{\lambda_M}$, т. е. она пропорциональна ε и тем больше, чем выше перегрузочная способность. Формула (217) дает перегрузку, преувеличенную примерно на 10%.

Уравнение (209) может быть написано применительно к начальному пусковому моменту M_{pp} ($s_p = 1$)

$$\frac{M_{pp}}{M_m} = \frac{2(1+\varepsilon)}{\frac{1}{s_m} + s_m + 2\varepsilon}.$$

Если коэффициент кратности пускового момента, т. е. отношение M_{pp} к M_N обозначим через a , то получим

$$a = \frac{M_{pp}}{M_N} = \frac{M_{pp}}{M_m} \cdot \lambda_M = \frac{2(1+\varepsilon)}{\frac{1}{s_m} + s_m + 2\varepsilon} \cdot \lambda_M = \frac{2(1+\varepsilon)s_m}{1 + 2\varepsilon s_m + s_m^2} \cdot \lambda_M. \quad (218)$$

Равенство (218) может быть использовано для определения связи перегрузки λ_M с коэффициентом a

$$s_m = \frac{1}{\lambda_a + \sqrt{\lambda_a^2 - 1}}, \quad (219)$$

где для сокращения

$$\lambda_a = \frac{\lambda_M}{a} \left(1 + \frac{\lambda_M - a}{\lambda_M} \cdot \varepsilon \right). \quad (220)$$

В формуле (219) знак $+$ относится к тому случаю, когда опрокидывающий момент имеет место при $s_m < 1$ — обычный случай. Знак $-$ относится к случаю получения опрокидывающего момента при $s_m > 1$. При малом активном сопротивлении обмотки статора можно принимать

$$\lambda_a = \frac{\lambda_M}{a}.$$

В ряде случаев электропривода, когда важно изучить работу двигателя от $s=0$ примерно до $s=1,3s_N$ в упрощенной формуле Клосса с достаточной для практики точностью можно пренебречь отношением $\frac{s}{s_m}$ по сравнению с отношением $\frac{s_m}{s}$. В таком случае получаем очень простую прямолинейную зависимость момента от скольжения s

$$M = M_m \cdot \frac{2s}{s_m} = c_s \cdot s = \frac{M_N}{s_N} \cdot s. \quad (221)$$

Отсюда, если за масштаб момента будем брать M_N , а за масштаб скольжения — s_N , то

$$\mu' \% = c' \% . \quad (222)$$

Полученная прямая (222) может быть построена по двум точкам: синхронной скорости $s=0$ и номинальному скольжению s_N , получаемому по номинальному числу оборотов в минуту, которое указывается на щитке машины.

Рассмотрим способ построения механических характеристик двигателей с кольцами при вводимых в цепь ротора добавочных омических сопротивлений.

Пренебрегая влиянием омического сопротивления статора, как и в равенстве 213, получим опрокидывающее скольжение согласно (208)

$$s_m = \frac{R'_2}{x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}}. \quad (223)$$

Это равенство остается справедливым и для искусственной характеристики

$$s_{mu} = \frac{R'_2 + R'_d}{x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}}. \quad (223')$$

В таком случае

$$\frac{s_{mu}}{s_m} = \frac{R'_2 + R'_d}{R'_2}. \quad (223'')$$

Уравнение механической характеристики при добавочном сопротивлении R_d будет по (213)

$$M = \frac{2 M_m}{\frac{s}{s_{mu}} + \frac{s_{mu}}{s}}$$

Возьмем случай одинаковых моментов на искусственной и естественной характеристике. При этом

$$\frac{s_u}{s_{mu}} + \frac{s_{mu}}{s_u} = \frac{s_e}{s_m} + \frac{s_m}{s_e} \quad (224)$$

Это равенство осуществляется лишь при условии, что

$$\frac{s_e}{s_m} = \frac{s_u}{s_{mu}} \quad (225)$$

Подставляя в (225) вместо s_{mz} из (223''), имеем

$$\frac{s_e}{s_m} = \frac{s_u}{s_m \frac{R'_2 + R'_d}{R'_2}} \quad \text{или} \quad \frac{s_u}{s_e} = \frac{R'_2 + R'_d}{R'_2} \quad (226)$$

Таким образом при любом одинаковом вращающем моменте для естественной и искусственной характеристики скольжение на искусственной характеристике во столько раз больше скольжения на естественной, во сколько раз сопротивление фазы цепи ротора больше внутреннего сопротивления фазы обмотки ротора.

Выражая (226) в процентах, получим

$$\sigma_u \% = \sigma_e \% \cdot \frac{(r'_2 + r'_d)\%}{r'_2\%} \quad (226')$$

В том случае, когда в упрощенной формуле Клосса (213) можно пренебречь $\frac{s}{s_{mu}}$ по сравнению с $\frac{s_{mu}}{s}$, мы получаем

$$M = \frac{2 M_m}{s_{mu}}$$

Подставляя из (223'), имеем

$$M = \frac{2 M_m \cdot s (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})}{R'_2 + R'_d}$$

При $x_{\sigma 1}$ и $x_{\sigma 2} = \text{const}$

$$M = c \cdot \frac{s}{R'_2 + R'_d} \quad (227)$$

Сделанное выше допущение автоматически предполагает два условия: 1) что опрокидывающее скольжение получается при $s > 1$; 2) что на всем диапазоне до $s_m > 1$ в роторной цепи можно пренебречь реактивным сопротивлением ротора по сравнению с активным сопротивлением роторной цепи.

Построение прямолинейных характеристик по равенству (227) никаких затруднений не представляет. Все характеристики прямолинейны и проходят через точку синхронной скорости n_0 . Любая вторая точка определяется по равенству (227), где

$$c = \frac{M_N}{s_N} \cdot R'_2.$$

Характеристики для двигательного режима и режима противовключения показаны на фиг. 110. Они идут тем круче, чем больше величина добавочного сопротивления в цепи ротора.

В режиме противовключения, называемого обычно в теории электрических машин режимом электромагнитного тормоза, асинхронная машина вращается против поля. Скольжение при этом больше единицы и практически меняется от 1 до 2. Очевидно, что подобный режим может быть получен переключением на ходу двух фаз асинхронного двигателя с последующим вращением его исполнительным механизмом.

Найдем связь между процентными значениями отдельных величин. При $s=1$ и при $R'_2 + R'_d = R'_N$ через ротор пойдет номинальный ток. Двигатель будет развивать номинальный момент M_N .

Отсюда

$$M_N = c \cdot \frac{1}{R'_N}. \quad (228)$$

Деля равенство (227) на (228), имеем

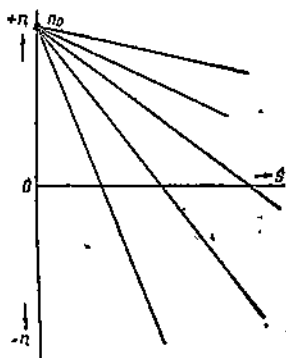
$$\frac{M_N}{M} s = \frac{R'_2 + R'_d}{R'_N}.$$

Умножая правую и левую часть на 100, получаем

$$\frac{R'_2 + R'_d}{R'_N} \cdot 100 = \rho \% = \frac{M_N}{M} \cdot \frac{s}{1} \cdot 100 = \frac{M_N}{M} \cdot \sigma \% \quad (229)$$

При $M = M_N$

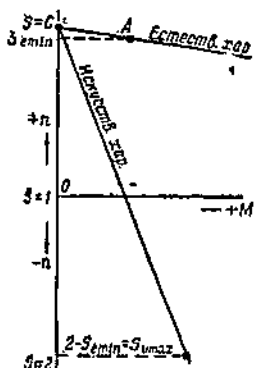
$$\rho \% = \sigma \% \quad (230)$$



Фиг. 110. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных сопротивлениях в цепи ротора.

Таким образом при номинальном моменте двигателя скольжение в процентах равно сопротивлению в процентах.

Очевидно, что приведенный метод расчета сопротивлений может быть применен и для режима противовключения. Во избежание больших толчков тока режим противовключения осуществляется на искусственных характеристиках. Если минимальное скольжение в рабочем режиме на естественной характеристике будет $s_{e \text{ min}}$, то максимальное скольжение в режиме противовключения на искусственной характеристике будет $s_{u \text{ max}}$. При этом согласно фиг. 111



$$s_{u \text{ max}} = 2 - s_{e \text{ min}}$$

Согласно (226)

$$\frac{s_{u \text{ max}}}{s_m} = \frac{R'_2 + R'_p + R'_d}{R'_2}$$

Фиг. 111. Переход с рабочего режима в режим противовключения.

где R'_2 — сопротивление обмотки фазы ротора; R'_p — пусковое сопротивление фазы ротора; R'_d — добавочное сопротивление противовключения на фазу.

В таком случае

$$R'_d = R'_2 \cdot \frac{s_{u \text{ max}}}{s_m} - (R'_2 + R'_p)$$

или

$$R'_d = R'_2 \cdot \frac{2 - s_{e \text{ min}}}{s_m} - (R'_2 + R'_p) \quad (231)$$

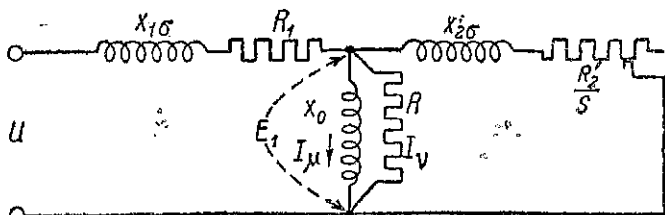
или в процентах

$$\rho'_d \% = \rho'_2 \% \cdot \frac{2 - s_{e \text{ min}}}{s_m} - (\rho'_2 + \rho'_p) \% \quad (232)$$

Для большинства задач в практике электропривода с электродвигателями с кольцами представляется возможным удовлетвориться прямолинейной частью механической характеристики. Это справедливо практически для рабочего режима, когда двигатель не подходит близко к точке опрокидывания и в сильной степени для пуска под реостатом, когда двигатель постепенно переходит по прямолинейным участкам искусственных механических характеристик (фиг. 108).

Точная зависимость $M = f(s)$ с учетом реактивного сопротивления в двигателях с кольцами необходима лишь при работе двигателя близко к точке опрокидывания, каковая может иметь место в случае работы электропривода с маховиком при ударной нагрузке. Пользование упрощенным уравнением Клосса для подоб-

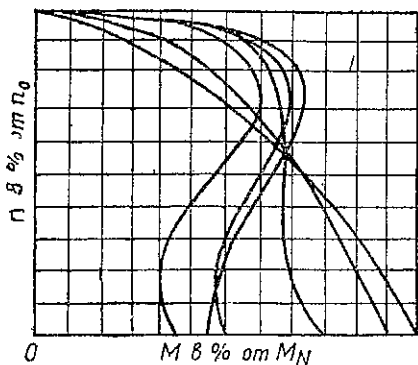
ных случаев дает значительные ошибки. Применение же полного уравнения Клосса встречает практические затруднения из-за отсутствия у проектировщиков необходимых параметров: величины ϵ и точного значения s_m . Несмотря на исключительную важность



Фиг. 112. Полная эквивалентная схема асинхронного двигателя.

этой последней величины, заводы предпочитают не давать ее в своих каталогах, так как теоретический расчет тоже не всегда дает достаточно точное значение, а экспериментальное определение s_m связано с некоторыми трудностями. Заводы ограничиваются в своих каталогах лишь величинами моментов M_{pp} , M_N , M_m и величины s_N , причем последняя, будучи определена по номинальному числу оборотов в минуту, дает расхождение с опытом до 25 %.

Это обстоятельство побудило целый ряд авторов в СССР попытаться дать такие формулы, которые достаточно точно отражали бы действительный характер кривой момента двигателя и по возможности получались бы на основании одних каталожных данных. Практический интерес к этому вопросу увеличился в связи с исключительным расширением приме-

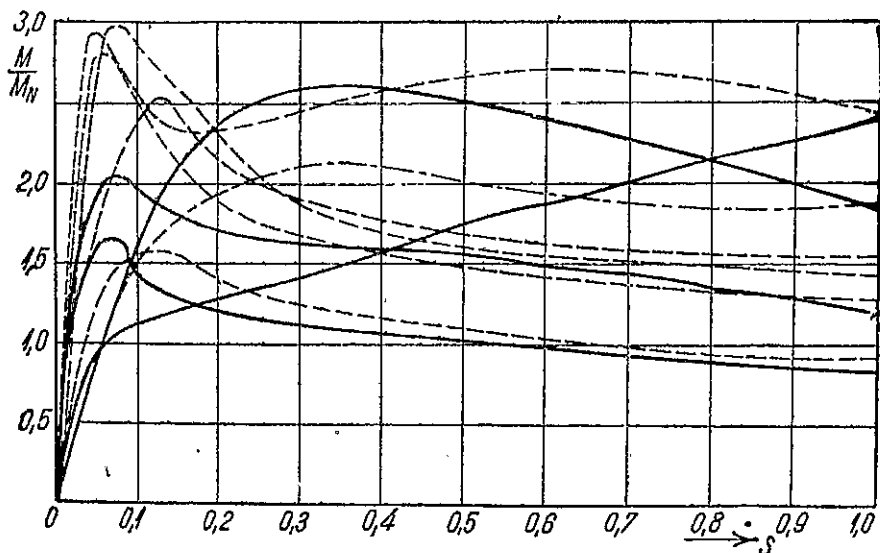


Фиг. 113. Типичные характеристики американских короткозамкнутых двигателей.

нения короткозамкнутых двигателей, в особенности для частых пусков в ход. Часть кривой момента асинхронного двигателя от $s > s_m$ до $s=2$, на которой работает короткозамкнутый двигатель при пуске и торможении противовключением, является криволинейной. Для решения задач о длительности пуска и торможения нужно знать точный характер этой кривой.

Упрощенное уравнение Клосса дает весьма малую точность в двигателях малой мощности с большой относительной величиной первичного активного сопротивления статора R_1 . При этом по существу совершенно обязательно исходить из полной эквивалентной схемы фиг. 112, так как при больших пусковых токах э. д. с.

E_1 сильно уменьшается. Так, при $R_1 = R'_2$ и $x_{1\sigma} = x'_{2\sigma}$ э. д. с. E_1 при $s=1$ достигает значения, равного половине U_N . Очевидно, что здесь уже никак нельзя допускать, что двигатель работает при постоянном потоке взаимной индукции статорной и роторной обмоток, т. е. при $E_1 = \text{const}$. К этому нужно добавить, что в целом ряде современных короткозамкнутых обыкновенных двигателей (не говоря уже о двигателях с глубоким пазом и типа Бушера) параметры не остаются постоянными. Ввиду сложности аналитических выражений момента для двигателей с переменными параметрами в целях более простых решений практических задач электропривода мы считаем совершенно необходимым, чтобы механические характеристики короткозамкнутых двигателей давались в каталогах графически, так



Фиг. 114. Характеристики некоторых короткозамкнутых двигателей завода „Электросила“.

№ кривой	Тип	Напряжение	Мощность	Число об/мин	Ротор
1	AM-450-2	6 000	400	2985	Бушера
2	вPRV-164-1000	500	20,5	940	"
3	BAO ₂ -2-1500	220/380	16	1 450	Глубокий паз
4	гAT-126-4	3 000	210	"	"
5	гАМО-15-2-4	6 000	1100	1 485	"
6	аPRV-3 ₀ -1000	3 000	300	985	"
7	AT-ПA-7-4	220/380	110	1 485	"
8	гАМО-14 ₃ -7-8	3 000	270	730	Обычной конструкции
9	И ₀ -21/6	127/210	1,3	"	"
10	PRV-98e	220	6,8	1 400	Бушера

же как даются характеристики серийных двигателей постоянного тока.

Исключительное разнообразие механических характеристик короткозамкнутых двигателей может быть проиллюстрировано фиг. 113 и 114, из которых на первой представлены типичные характеристики короткозамкнутых двигателей, изготавливаемых американскими заводами для металлорежущих станков [Л. 60], а на второй — характеристики некоторых короткозамкнутых двигателей завода „Электросила“.

Работы отдельных наших авторов и имели целью, с одной стороны, получить достаточно точные данные для кривой двигателя с кольцами около точки опрокидывания, с другой стороны, дать простое выражение для кривой момента короткозамкнутого двигателя, которое можно было выразить по параметрам каталожных данных [Л. 61 — 70]. Среди них можно найти варианты замены характеристики несколькими прямыми, параболой, прямой и параболой, нахождение формы кривой по трем точкам и т. д. Мы считаем, что для работы двигателя с кольцами около точки опрокидывания и для пусковых и тормозных режимов короткозамкнутых двигателей с почти постоянными параметрами целесообразно пользоваться полным уравнением Клосса. Для короткозамкнутых же двигателей с сильно переменными параметрами, в частности, для двигателей Бушера и с глубоким пазом, необходимо иметь графический вид характеристики.

Заметим, что попытки выразить характеристики двигателей Бушера и с глубоким пазом по типу упрощенного уравнения Клосса дают такие выражения для момента, которые практически при решении уравнения движения прихода использованы быть не могут.

40. Торможение асинхронных двигателей

Основных обычно применяемых режимов торможения в асинхронных двигателях три: 1) режим противовключения; 2) режим рекуперативного торможения при работе машины асинхронным генератором выше синхронной скорости; 3) режим динамического торможения, т. е. работы машины синхронным генератором на отдельное сопротивление при переменной частоте. Все эти три способа применимы принципиально как к двигателям с кольцами, так и к короткозамкнутым. Физика процессов и расчет характеристик для режима противовключения рассмотрены выше. Здесь отметим лишь, что тормозные характеристики этого режима (фиг. 110 и 111) отличаются значительной крутизной, что в ряде случаев практики, главным образом для двигателей подъема грузов, представляет известные минусы. Невнимательность машиниста при спуске тяжелого груза, выразившаяся в установке контроллера не на соответствующее положение, может вызвать разнос груза с вращаемым им двигателем.

Режим рекуперативного торможения при работе машины асинхронным генератором выше синхронной скорости практически применяется главным образом в двигателях с переключением полюсов. Если машина работает при высшей скорости $n_{02} = \frac{f \cdot 60}{p_2} \times (1 - s_2)$, т. е. при меньшем числе полюсов, то для торможения она переключается на большее число полюсов $2p_1$, соответствующее

ющее меньшей синхронной скорости $n_{01} = \frac{f \cdot 60}{p_1} < n_s$. В пределах от n_s до n_1 машина работает в режиме асинхронного генератора. Соответствующие механические характеристики и переход по ним показаны на фиг. 115.

Для скорости ниже, чем n_1 , в данном случае применен способ торможения противозвключением.

Разбор условий переключения обмотки короткозамкнутых двигателей на различное число полюсов и некоторая специфика их

работы рассмотрены далее в отделе регулирования скорости [п. 105].

Режим рекуперативного торможения используется также в подъемно-транспортных устройствах при спуске тяжелых грузов. При этом машина работает асинхронным генератором, возвращая энергию, полученную от спускающегося груза, обратно в сеть.

В случае динамического торможения машина возбуждается (обычно в статор) постоянным током от соответствующей сети или возбудителя или, наконец, от купроксного (меднозакисного) выпрямителя. Роторная обмотка в двигателях с кольцами работает, как генераторная, на реостат. В короткозамкнутом двигателе роторная обмотка используется как обмотка короткозамкнутого генератора. Машина работает вообще, как имеющий неподвижные полюса синхронный генератор

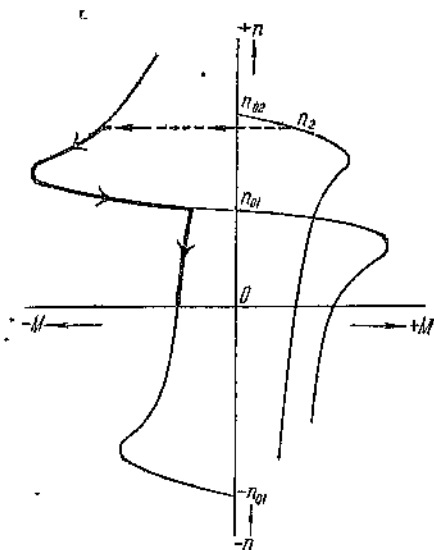
Фиг. 115. Комбинированное рекуперативное торможение и торможение противозвключением асинхронного двигателя.

переменной частоты, которая уменьшается по мере снижения скорости.

В данном случае также говорят о скольжении машины, под которым понимают отношение $s = \frac{n}{n_0}$. Форма кривой тормозного

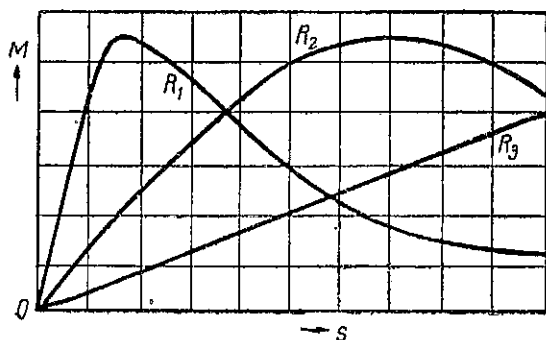
момента в этом случае почти одинакова с формой момента асинхронной машины и представлена на фиг. 116 для трех различных сопротивлений в цепи ротора. Обмотки статора в подобном режиме включаются на сеть постоянного тока по одной из схем фиг. 117. Каждое включение дает свою форму кривой э. д. с., свое значение потока. Различные важные для практических расчетов соотношения отдельных схем представлены в табл. VII.

На практике по условиям простоты включения наиболее часто применяют схемы 1-я 2 табл. VII. Питание обмоток статора по-

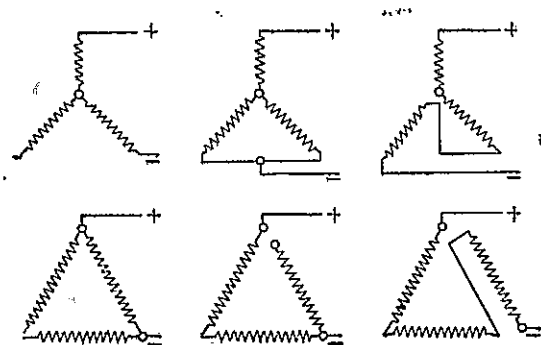


стоянным током у короткозамкнутых двигателей весьма часто производится от сети через купроксные выпрямители [Л. 72—74]. Соответствующая схема показана на фиг. 118.

Работа асинхронной машины в режиме динамического торможения имеет следующее весьма важное принципиальное отличие



Фиг. 116. Кривая момента асинхронной машины в режиме динамического торможения.

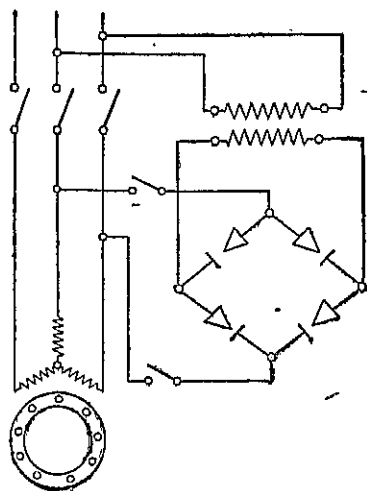


Фиг. 117. Возможные способы включения постоянного тока в обмотку статора.

от работы в нормальном двигательном режиме. При нормальной работе асинхронного двигателя намагничивающий ток машины, и стало быть, и магнитный поток, при изменении скольжения остаются постоянными. При динамическом торможении магнитный поток с изменением скорости машины меняется в результате непрерывного изменения намагничивающих ампервитков, состоящих из неизменных ампервитков статора (постоянного тока) и меняющихся ампервитков ротора (переменного тока переменной частоты).

Если результирующий намагничивающий ток, приведенный к числу витков статора, обозначить через I_{μ} , то

$$I_{\mu} = \frac{I_m \omega_1 + I_2 \omega_2}{\omega_1}, \quad (233)$$



Фиг. 118. Питание статора асинхронного двигателя постоянным током от сети переменного тока через купроксный выпрямитель.

от работы в нормальном двигательном режиме. При нормальной работе асинхронного двигателя намагничивающий ток машины, и стало быть, и магнитный поток, при изменении скольжения остаются постоянными.

Некоторые характерные величины для различных способов

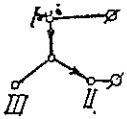
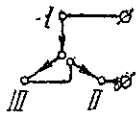

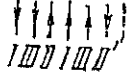
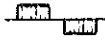


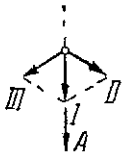
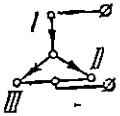
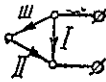



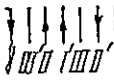

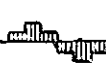
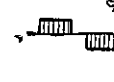



Схема соединения		
Схема направления токов в обмотке		
Кривые м. д. с. при одном паде на полюс и фазу		
Диаграммы м. д. с. и потоков		
Общий поток Φ_1 (при потоке 1-й фазы Φ)	$\sqrt{3} \cdot \Phi$	2Φ
Постоянный ток I_m , дающий то же поле, что и вращающееся магнитное поле переменного тока при токе линейном I_l	$I_l \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 1,23 I_l$	$\frac{3\sqrt{2}}{4} \cdot I_l = 1,06 I_l$
Сопротивление между фазами	$2R$	$3R$
Соотношение напряжения постоянного тока при равном токе первой фазы	2	3
Соотношение напряжений постоянного тока, дающее поле одной величины	$\sqrt{3} = 1,73$	$9/4 = 2,25$
Соотношение мощностей постоянного тока при одинаковом поле	1	$9/8 = 1,12$
Потери в меди на намагничивание при одинаковом постоянном токе I_m	$2 I_m^2 R = 2 (1,23 I_l)^2 \cdot R = 3 I_l^2 \cdot R$	$3 I_m^2 R = 3 (1,06 I_l)^2 \cdot R = 3,37 I_l^2 \cdot R$

Таблица VII

соединения обмоток ротора при питании постоянным током

		
		
		
		
$3/2 \Phi$	$3/2 \Phi$	$\sqrt{3} \cdot \Phi$
$\sqrt{2} I_l = 1,41 I_l$	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot I_l = 1,23 I_l$	$\sqrt{2} I_l = 1,41 I_l$
$3/2 R$	$2/3 R$	$1/2 R$
$3/2$	1	1
$3/2$	1	$\sqrt{3/2} = 0,87$
1	1	1
$I_m^2 R + \left(\frac{I_m}{2}\right)^2 R =$ $= (1,41 I_l)^2 \cdot R +$ $+ \left(\frac{1,41}{2} I_l\right)^2 R = 3 I_l^2 R$	$\left(\frac{2}{3} I_m\right)^2 \cdot R + 2 \left(\frac{1}{3} I_m\right)^2 \cdot R =$ $= (2/3 \cdot 1,23 \cdot \sqrt{3} \cdot I_l)^2 \cdot R +$ $+ 2 \left(\frac{1}{3} \cdot 1,23 \cdot \sqrt{3} \cdot I_l\right)^2 \cdot R =$ $= 3 I_l^2 \cdot R$	$2 \left(\frac{I_m}{2}\right)^2 \cdot R =$ $= 2 \left(\frac{1,41}{2} \sqrt{3} \cdot I_l\right)^2 \cdot R =$ $= 3 I_l^2 \cdot R$

где I_m — такой статорный переменный ток, одинаковый для всех трех фаз, который создает те же ампервитки, что и посылаемый в обмотку постоянный ток; I_2 — фазный роторный ток, ω_1 и ω_2 — соответственно числа последовательно соединенных витков фазы статора и ротора. Значение I_m может быть найдено из 6-й графы табл. VII.

Вычисление тормозного момента асинхронной машины в режиме динамического торможения может быть выполнено лишь на основании общей теории синхронной машины с неявно выраженными полюсами [Л. 86]. Применяя соответствующую теорию к рассматриваемому случаю, Касьяков [Л. 83—84] получил следующее выражение для момента машины в режиме динамического торможения:

$$M = \frac{3p \cdot I''_2{}^2 \cdot (R + R_d)}{9,81 \cdot 2\pi} \cdot \frac{f}{(50b)^2 \cdot (R + R_d)^2 + f^2 \cdot (1 + bx)^2}, \quad (234)$$

где

$$I''_2 = 0,8 \cdot I_m \cdot \frac{U_{Ns}}{U_{Nr}} \quad (\text{для схем 1 и 4 табл. VII}). \quad (235)$$

В этих равенствах: p — число пар полюсов машины; I''_2 — ток возбуждения, приведенный к обмотке ротора; I_m — постоянный ток возбуждения статора; U_{Ns} и U_{Nr} — номинальные фазные напряжения статора и ротора; f — переменная частота тока ротора; R и R_d — соответственно активные фазные сопротивления обмотки ротора и добавочного реостата; x — реактивное сопротивление обмотки ротора при 50 Hz; b — реактивная проводимость намагничивания, равная приближенно $\frac{I_\mu}{U_{Ns}}$, где I_μ — результирующий намагничивающий ток ротора, пропорциональный результирующим ампервиткам.

Наибольшую трудность при пользовании этой формулой представляет учет насыщения, меняющегося в условиях динамического торможения в широких пределах. Степень насыщения в формуле (234) учитывается величиной

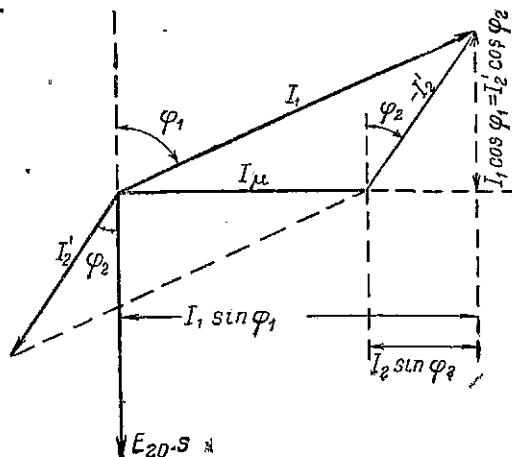
$$b = \frac{I_\mu}{E_1} = \frac{I_\mu}{U_{Ns}}. \quad (236)$$

При точных расчетах приходится определять величину b для каждой нагрузки. Сначала строят кривую $b = \varphi(I_\mu)$ по формуле $b = \frac{I_\mu}{E_1}$. Далее для данной нагрузки находится величина I_μ по формуле

$$I_\mu = E_1 \cdot b = \frac{I_2 \cdot \sqrt{(fbx)^2 + [50b(R + R_d)]^2}}{\sqrt{f^2(1 + bx)^2 + [50b(R + R_d)]^2}}. \quad (237)$$

При этом в (237) подставляют значение b , соответствующее холостому ходу. По найденному I_m и кривой $b = \varphi(I_m)$ находят первое приближение b . Если оно не совпадает с исходным значением, то снова находят b , снова I_m . Получают второе приближение, а иногда и третье. При менее точных расчетах можно пользоваться средним значением b ;

Вычисление развиваемого двигателем момента может быть сделано также следующим способом [Л. 85, 79—82]. На фиг. 119



Фиг. 119. Векторная диаграмма токов асинхронного двигателя.

представлена упрощенная векторная диаграмма токов асинхронного двигателя. Из нее следует, что

$$I_{\mu} + I_2' \sin \varphi_2 = I_1 \sin \varphi_1, \quad (238)$$

где I_2' — вторичный ток, приведенный к первичной обмотке.

Так как

$$I_2' \cos \varphi_2 = I_1 \cos \varphi_1, \quad (239)$$

то, возводя (238) и (239) в квадрат и складывая их, получим

$$I_{\mu}^2 + 2 I_{\mu} I_2' \sin \varphi_2 + I_2'^2 = I_1^2. \quad (240)$$

Как известно,

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_2' \cdot s}{z_2'}, \quad (241)$$

$$I_2' = \frac{E_2' \cdot s}{z_2'} = \frac{E_1 \cdot s}{z_2'}, \quad (242)$$

где $E_2' x$ — приведенная к первичной обмотке э. д. с., индуктированная в роторе при рассматриваемом намагничивающем токе и синхронной скорости ротора n_0 , E_1 — э. д. с., индуктированная в роторе в нормальных условиях при том же намагничивающем токе. Подставляя (241) и (242) в (240), получим

$$I_{\mu}^2 + 2 I_{\mu} \cdot E_1 \cdot \frac{x_2' s^2}{z_2'^2} + E_1^2 \cdot \frac{s^2}{z_2'^2} = I_1^2. \quad (243)$$

Величина E_{12}^{μ} сама по себе является функцией реактивной проводимости намагничивания b ($E_1 = \frac{I_m}{b}$). (236)

Подставляя в (243) равенство (236), получим

$$I_2^{\mu} = \frac{I_1^2 \left(\frac{R_2'}{s^2} + x_2'^2 \right)}{1 + \frac{2}{b} \cdot \frac{x_2' \cdot s^2}{z_2'^2} + \frac{1}{b^2} \cdot \frac{s_2^2}{z_2'^2} - \frac{R_2'}{s^2} + \left(x_2' + \frac{1}{b} \right)^2}$$

или

$$I_2^{\mu} = \frac{I_1 \cdot z_2'}{s \sqrt{\left(\frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(x_2' + \frac{1}{b} \right)^2}} \quad (244)$$

Очевидно, что приведенная к обмотке статора вторичная э.д.с.

$$E_2^{\mu} = \frac{I_2^{\mu} \cdot s}{b} = \frac{I_1 \cdot z_2'}{b \sqrt{\left(\frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(x_2' + \frac{1}{b} \right)^2}} \quad (245)$$

Приведенный вторичный ток

$$I_2' = \frac{E_2^{\mu}}{z_2'} = \frac{I_1}{b \sqrt{\left(\frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(x_2' + \frac{1}{b} \right)^2}} \quad (246)$$

откуда получаем выражение вращающего момента машины в виде:

$$M = \frac{3 I_2'^2 R_2'}{9,81 \omega_0 \cdot s} = \frac{3}{9,81 \omega_0 \cdot s} \cdot \frac{I_1^2 R_2'}{b^2 \left[\left(\frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(x_2' + \frac{1}{b} \right)^2 \right]} \quad (247)$$

В частном случае ненасыщенной машины реактивная проводимость намагничивания $b = \text{const}$. При этом величина опрокидывающего скольжения s_m , определяемого дифференцированием (247) по s , будет

$$s_m = \frac{R_2'}{x_2' + \frac{1}{b}} \quad (247')$$

Соответственно максимальный момент

$$M_m = \frac{3}{9,81} \cdot \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{I_1^2}{2b^2 \left(x_2' + \frac{1}{b} \right)} \quad (248)$$

Деля (248) на (247) и учитывая (247'), получаем и для данного случая упрощенное уравнение Клосса

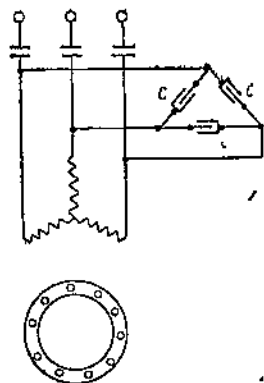
$$M = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}. \quad (213)$$

Таким образом и в режиме динамического торможения вторичное активное сопротивление оказывает на форму вращающего момента такое же влияние, как и в двигательном режиме, а именно изменение R'_2 перемещает максимум, не меняя его величины, которая зависит от x'_2 и b .

Более подробное рассмотрение процессов, происходящих при динамическом торможении, можно найти в [Л. 79—85]. Здесь отметим лишь, что увеличение тормозного момента может быть достигнуто увеличением силы постоянного тока, питающего обмотку статора. Предел величине постоянного тока ставится: 1) нагревом; 2) односторонним магнитным притяжением между статором и ротором. При обычно применяющихся в двигателях с кольцами волновых обмотках ротора магнитное притяжение остается несбалансированным ни при неподвижной, ни при вращающейся машине. В короткозамкнутых двигателях одностороннее притяжение полностью выявляется лишь при неподвижном роторе.

Необходимо отметить еще один способ торможения, который стали применять в последнее время в некоторых установках с короткозамкнутыми двигателями — так называемое конденсаторное торможение. В этом случае для торможения к статорной обмотке приключаются статические конденсаторы по схеме фиг. 120. Машина работает самовозбужденным асинхронным генератором, получая намагничивающий ток от конденсатора [Л. 75—77]. Будучи возбуждена со стороны статора переменным током, машина генерирует в роторе э. д. с. Генерируемая энергия поглощается в обмотке ротора. В короткозамкнутых двигателях малой мощности иногда применяют также торможение посредством тормозного электромагнита.

Сопоставляя все перечисленные способы торможения применительно к широко распространенным короткозамкнутым двигателям, приходится высказать следующее положение [Л. 78]. Тормозные электромагниты требуют добавочного места и обуславливают трудности обслуживания при частых пусках. Противовклю-



Фиг. 120. Приключение статических конденсаторов к асинхронному короткозамкнутому двигателю в целях торможения.

чение дает наилучший эффект в отношении быстроты торможения, однако, обуславливает значительную силу тормозного тока, повышение индуктированной в роторе э. д. с. в первый период торможения, большие потери энергии в роторной и статорной цепях. Кроме того этот метод требует специальной аппаратуры для отключения двигателя при приближении к нулевой скорости во избежание разгона в противоположную сторону (если реверс не требуется). Надежной конструкции такой аппаратуры у нас пока не создано. Динамическое торможение не требует большого количества энергии, но зато вызывает необходимость наличия источника постоянного тока. Динамическое торможение наиболее подходит для плавного торможения.

Для быстрых торможений наиболее подходящим следует считать противовключение, в случае же его невозможности по условиям толчка тока или из-за отсутствия соответствующей аппаратуры целесообразно применение тормозного электромагнита с отдельным выключателем для него. Для частых пусков могут быть применены как динамическое торможение, так и противовключение.

Конденсаторное торможение мало эффективно и по первоначальной стоимости обходится дорого.

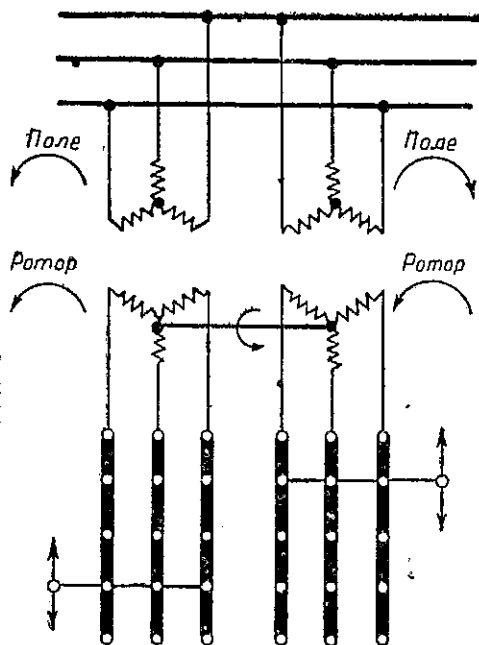
Если сравнить стоимость установки короткозамкнутого двигателя при различных способах торможения, то получим по американским данным следующие цифры: 1) при тормозном электромагните — 100%; 2) при противовключении на полном напряжении — 135%, при пониженном — 200% (за счет трансформатора), 3) при динамическом торможении с купроксами 150—250%; 4) при конденсаторном торможении и напряжении 440—500V — 200%; при напряжении 220V — 250%.

41. Специальные способы торможения асинхронных двигателей с кольцами

Некоторая ограниченность торможения асинхронных двигателей путем рекуперации энергии, необходимость в постоянном токе при динамическом торможении и крутизна механических характеристик при противовключении повели к созданию в Германии ряда специальных схем торможения, главным образом для подъемно-транспортных устройств. Из этих схем следует отметить лишь три: 1) схему с двумя двигателями; 2) схему однофазного включения; 3) схему с добавочным генератором постоянного тока. В наших условиях эти схемы почти не нашли применения, поэтому на них мы остановимся весьма кратко.

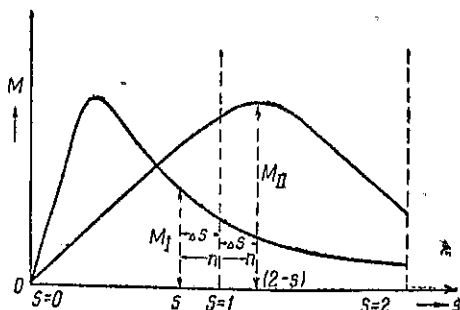
В первой схеме один подъемный двигатель заменяется двумя двигателями половинной мощности. Такая замена сама по себе в некоторых случаях представляет преимущество за счет более простого их размещения и меньшего махового момента.

При двигательной работе поле статора в обеих машинах вращается в одну и ту же сторону, и моменты машин складываются; при торможении один из двигателей работает в режиме проти-

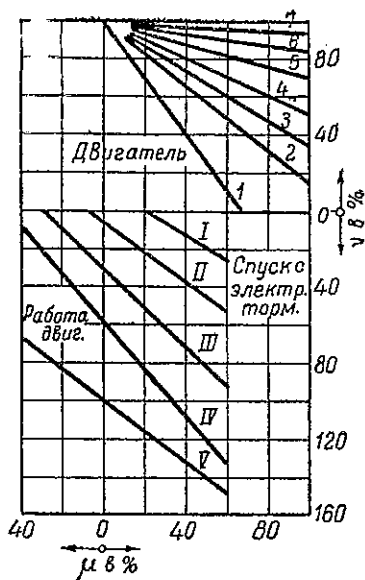


Фиг. 121. Схема включения двух асинхронных двигателей на один вал для получения плоских тормозных характеристик.

вовключения (фиг. 121). На валу системы будут два момента: один—двигательный, второй—тормозной. Величину каждого из них по отдельности можно менять сопротивлениями в роторах. Сложение моментов иллюстрируется фиг. 122а. На нем M_I — кривая двигательного момента одного двигателя, работающего при скольжении $s_1 = s$; M_{II} — кривая тормозного момента двигателя, работающего при скольжении $s_2 = (2 - s)$. Результирующий тормозной момент на валу будет равен $(M_{II} - M_I)$. Расчет схемы никаких особенностей не представляет.



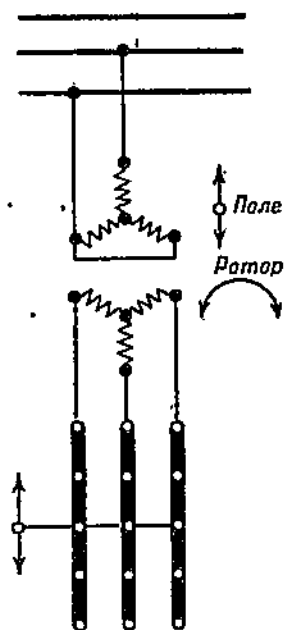
Фиг. 122а. Сложение вращающих моментов для схемы фиг. 121.



Фиг. 122б. Двигательные и тормозные характеристики для схемы фиг. 121.

Фиг. 122б. Двигательные и тормозные характеристики для схемы фиг. 121.

На фиг. 122b приведены для одной подобной крановой схемы с двумя двигателями двигательные характеристики (верхняя часть) и тормозные характеристики (нижняя часть). Последние включают 4 характеристики торможения специальным включением двух двигателей и пятую — рекуперативного торможения для обоих двигателей. Как видно, тормозные характеристики примерно подобны таковым для сложных схем включения серийного двигателя. Практическое применение этого метода ограничено из-за усложнения и удорожания оборудования.



Фиг. 123. Схема однофазного торможения.

В 1929 г. фирмой SSW была предложена схема однофазного торможения. Согласно этой схеме, представленной на фиг. 123, статор двигателя во время торможения включается на сеть как однофазный, и кроме того, что очень существенно, две фазы статора включаются на одну и ту же фазу сети. В отличие от обычной схемы однофазного асинхронного двигателя, в которой последний работает двигателем при вращении в обе стороны, при этой схеме двигатель всегда работает как тормоз, независимо от того, в какую сторону он вращается. Основная причина этого явления заключается в соединении двух фаз между собой.

Присходящие при этом процессе явления в первом грубом приближении можно рассматривать двояким образом. Первый способ рассмотрения, данный Гевеке, заключается в следующем. Машину во время торможения можно рассматривать как трехфазный генератор, возбуждаемый со стороны статора однофазным пульсирующим полем и работающий на реостат ротора. В роторе при вращении индуктируются э. д. с. частоты скольжения. Машина отдает из ротора энергию на регулировочный реостат, т. е. работает как генератор.

Однако такое рассмотрение не совсем согласно с теорией работы однофазного асинхронного двигателя, ибо последний, будучи раскручен в любую сторону, станет вращаться как двигатель в ту сторону, в которую он раскручен, т. е. как будто при вращении машины должен получаться лишь двигательный момент, а не тормозной.

Только наличием дополнительной индуктивной связи статора с ротором можно объяснить то явление, что машина при определенном подборе сопротивлений остается работать в тормозном

режиме при всех скоростях. Эта связь создается замыканием двух фаз статора на себя.

Автор считает более целесообразным рассматривать данный процесс с точки зрения обычной теории однофазной машины — теории синхронного и обратно-синхронного полей.

В обычном однофазном асинхронном двигателе моменты, создаваемые синхронным и обратно-синхронным полями, могут быть представлены согласно фиг. 124. Подобная картина будет иметь место при равных активных сопротивлениях цепи ротора для синхронного и обратно-синхронного полей. При вращении вправо преобладает двигательный момент над тормозным, при вращении влево мы имеем аналогичный случай.

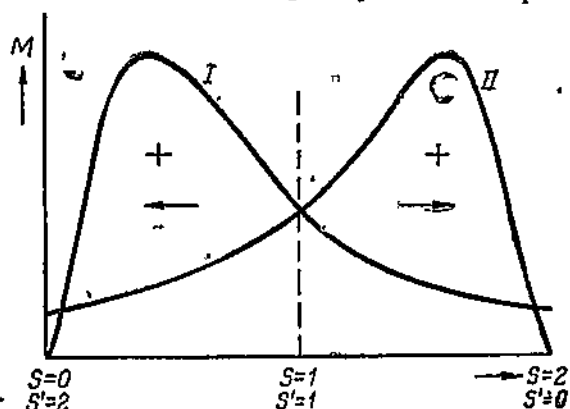
Влияние короткозамкнутого контура в машине (замкнутых на себя двух фаз статорных обмоток) не искажает эту симметрию, но вследствие изменения параметров цепи ротора сдвигает кривые вращающих моментов от синхронного и обратно-синхронного полей, меняя вообще их максимум.

Влияние этих параметров вызывает смещение кривых моментов так, как это показано на фиг. 125. В положении покоя включенная таким образом машина, как и обычная однофазная, не развивает никакого момента. При вращении ее в любую сторону отрицательный момент преобладает над положительным, т. е. машина работает тормозом. Тормозные характеристики в этом случае приобретают вид II, III и IV на фиг. 126. I — относится к противовключению; V — к рекуперативному торможению, $I-VI$ — двигательные характеристики. Весь комплекс относится к некоторой крановой схеме.

Эти кривые, конечно, уступают плавным кривым перехода из двигательного режима в генераторный, имеющим место в шунтовых машинах при скоростях, больших скоростей холостого хода, и в серийных двигателях при специальных схемах.

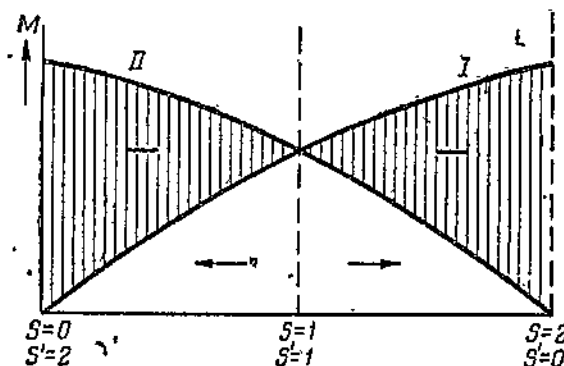
Однако практически эти кривые являются вполне удовлетворительными.

Недостатком подобного способа торможения является однофазная работа машины при торможении. Однофазная работа имеет

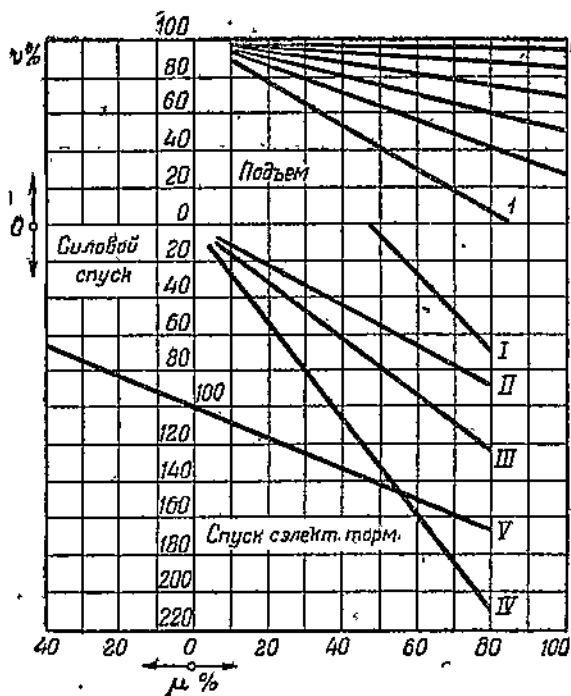


Фиг. 124. Кривые вращающих моментов от синхронного и обратносинхронного поля в однофазном двигателе.

три неприятных последствия: а) использование однофазной машины хуже, чем трехфазной, а потому размеры машины для получения надлежащих тормозных моментов приходится несколько увеличивать; б) потери в самой машине во время режима торможения за счет обратно-синхронного поля должны несколько повыситься, и расход энергии увеличивается; в) большее количество однофазных двигателей, работающих на трехфазной сети, теоретически может вызывать некоторую несимметрию нагрузки, что может повести к искажению линейных напряжений с соответствующими последствиями, а именно: ухудшением использования всех двигателей, включенных на сеть (в некоторых случаях), и ухудшением условий работы (иногда порчей) осветительных приемников. Однако надлежащее распределение таких двигателей при торможении при большом их числе по отдельным фазам вполне может устранить влияние несимметрии. Поэтому принципиальное возражение против этой схемы в отношении создания ею несимметрии практически несущественно.



Фиг. 125. Кривые вращающих моментов синхронного и обратносинхронного поля в схеме SSW.



Фиг. 126. Тормозные характеристики для схемы SSW.

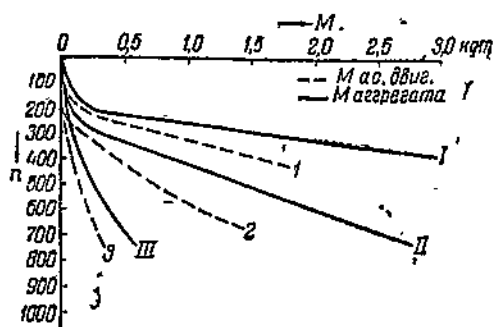
Теоретическое рассмотрение этой схемы может быть сделано посредством того метода, который обычно применяют при изучении явлений несимметрии в электрических системах, а именно метода симметричных составляющих.

Подробное рассмотрение схемы с приведением метода расчета характеристик даво Аглицким [Л. 87].

О торможении с помощью насаженного на вал вспомогательного генератора постоянного тока отметим следующее.

Если бы задачу торможения возложить всецело на добавочную машину постоянного тока, то она получилась бы большой мощности, равной примерно мощности асинхронного двигателя. В целях удешевления установки на вспомогательный генератор возлагается обычно лишь задача некоторого выправления тормозных характеристик асинхронного двигателя. Во избежание необходимости в добавочном источнике постоянного тока вспомогательный генератор работает при самовозбуждении. Он может быть принципиально как серийным, так и шунтовым.

Асинхронный двигатель при этом остается приключенным также к сети и работает по принципу противовключения. Очевидно, что тормозные характеристики агрегата могут быть получены суммированием характеристик асинхронного двигателя и добавочной машины. Подобные схемы были, например, предложены для торможения двигателей шахтного подъемника. Однако распространения они не получили. Характеристики для одного случая представлены на фиг. 127.



Фиг. 127. Выпрямление тормозных характеристик асинхронного двигателя посредством вспомогательного генератора постоянного тока.

42. Механические характеристики синхронных двигателей

Синхронный двигатель является двигателем строго постоянной скорости, у которого $n = \text{const}$. Однако при изменении нагрузки в нем имеют место мгновенные колебания скорости за счет изменения угла θ . Практически эти колебания имеют существенное значение при работе синхронного двигателя на пульсирующую нагрузку, например, на поршневой компрессор. В таких случаях для решения вопроса о поведении двигателя важно знать зависимость между моментом M и θ .

Как известно, в синхронном двигателе электромагнитный момент M_{ψ} прямо пропорционален электромагнитной мощности P_{ψ}

и является функцией угла θ — угла расхождения между осью полюсов и осью результирующего потока машины:

$$M_{\psi} = \frac{P_{\psi}}{\omega_0} = \frac{m \cdot E_Q}{\omega_0 \cdot z} \left[U \cos(\psi_a - \theta) - E_Q \cos \psi_a \right], \quad (249)$$

где U — напряжение на зажимах машины; E_Q — э. д. с. холостого хода; m — число фаз; z — полное синхронное сопротивление; $\psi_a = \arctg \frac{x}{r}$, где r — активное сопротивление; x — синхронное реактивное сопротивление обмотки статора.

Пологая $r=0$ и $\psi_a=90^\circ$ для электромагнитного момента, получим выражение

$$M_{\psi} = \frac{m \cdot E_Q \cdot U}{\omega_0 \cdot x} \cdot \sin \theta. \quad (250')$$

Обозначая $\frac{m \cdot E_Q \cdot U}{\omega_0 \cdot x} = M_{\max}$, получим

$$M_{\psi} = M_{\max} \cdot \sin \theta. \quad (250)$$

Величина M_{\max} в килограммометрах может быть выражена как $\left(\frac{\sqrt{3} U I_k}{1,03 n_0} \right)$, где U — линейное напряжение; I_k — ток короткого замыкания при соответствующем возбуждении; n_0 — число оборотов в минуту. Равенством (250) и пользуются обычно в практике привода при рассмотрении мгновенных колебаний скорости синхронного двигателя при пульсирующей нагрузке.

Пуск современного синхронного двигателя производится исключительно в качестве асинхронного от нормального и пониженного напряжения. Уравнение вращающего момента для этого случая получается из рассмотрения параметров электрических цепей, активных и реактивных сопротивлений по продольной и по поперечной осям полюсов, являющихся двумя основными осями симметрии синхронной машины. Рассмотрение этого сложного вопроса выходит за пределы учебника [Л. 88 и 89].

Мы здесь отметим, что в пусковом режиме синхронного двигателя играют роль следующие вращающие моменты: 1) асинхронный, создаваемый пусковой обмоткой; 2) момент обмотки возбуждения; 3) момент от токов Фуко в полюсных наконечниках; 4) гистерезисный момент; 5) реактивный момент.

В настоящее время имеется целый ряд теорий, позволяющих провести расчет пусковых характеристик. В основу расчета положена теория всеобщего трансформатора, дающая возможность получить уравнение момента и тока в зависимости от эквивалентного сопротивления машины. Степень учета влияния конструкции явно выраженных полюсов и влияние магнитной и элект-

трической несимметрии являются спецификой отдельных методов расчета. Наиболее точными и пригодными для практических целей следует считать методы Давидсона (Davidson) и Линвилля (Linville).

Метод Давидсона оказывается вполне подходящим для тихоходных машин при пуске под большой нагрузкой.

Метод Линвилля [Л. 89] дает наиболее точные результаты и пригоден для расчета пусковых характеристик любых синхронных двигателей с явно выраженными полюсами. Метод пренебрегает насыщением и явлением гистерезиса.

Сложность подсчета параметров синхронных двигателей и обычное отсутствие этих данных у проектировщиков электропривода побуждает настаивать на том, чтобы машиностроительные заводы давали в своих каталогах на синхронные двигатели графические характеристики M и $I=f(s)$. Формы кривых момента и тока подобны более или менее таковым для асинхронных короткозамкнутых двигателей. Ряд характеристик приведен ниже в гл. XI. Особое положение в работе синхронного двигателя при пуске занимает синхронизирующий процесс, протекающий после включения в обмотку возбуждения постоянного тока. Упрощенно для этого случая можно принимать наличие трех вращающихся моментов:

1. Синхронного $M_s = M_{\max} \cdot \sin\theta$.

2. Асинхронного. Этот момент при малом скольжении пропорционален этому последнему, так что

$$\frac{M_a}{s_a} = \frac{M_N}{s_N} = M_{Q1} = \text{const},$$

где M_N и s_N — номинальный момент и номинальное скольжение при работе двигателя на пусковой обмотке.

Но скольжение есть не что иное, как скорость изменения угла θ в механических радианах:

$$s_a \omega_0 = \frac{d\theta}{dt}, \quad (251)$$

откуда

$$M_a = \frac{M_N}{s_N} \cdot s_a = \frac{M_N}{s_N} \cdot \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{d\theta}{dt} = M'_{a1} \frac{d\theta}{dt}, \quad (252)$$

Величина M'_{a1} численно в килограммометрах равна $\frac{M_{a-0,05}}{15,7}$,

где $M_{a-0,05}$ — асинхронный момент пусковой обмотки при скольжении $s=0,05$ и разомкнутой обмотке возбуждения.

3. Реактивного момента, возникающего из-за наличия явно выраженных полюсов. Упрощенное выражение для этого момента

$$M_r = \zeta \cdot M_s \cdot \sin 2\theta. \quad (253)$$

Величина коэффициента ζ зависит от степени возбуждения полюсов и может иметь значение от $\frac{1}{4}$ до 1.

Таким образом общее выражение момента синхронного двигателя в период синхронизации будет

$$M_d = M_{\max} \cdot \sin \theta + M'_{a1} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \zeta \cdot M_s \sin 2\theta. \quad (254)$$

Величина $\zeta \cdot M_s$ численно в килограммометрах равна

$$\zeta M_s = \frac{U^2}{1,03n_0} \cdot \frac{x_d - x_q}{2x_d \cdot x_q},$$

где x_d и x_q — продольная и поперечная синхронная реактивность в омах.

Для получения точного решения необходимо учесть еще дополнительный момент, обусловленный переходными токами в обмотке возбуждения, однако мы этот момент для упрощения здесь опускаем.

Приведенные уравнения мы и сможем в дальнейшем использовать для решения некоторых задач синхронного электропривода.

Торможение синхронных двигателей практически может быть осуществлено лишь двумя способами: 1) противовключением, как асинхронного; 2) использованием динамического торможения, при котором обмотка статора нормально возбужденной машины включается на реостат. Работа генератором с рекуперацией энергии в сеть возможна лишь при синхронной скорости, а потому для целей торможения этот режим практического значения почти не имеет.

Способы расчета тормозных характеристик противовключения одинаковы с таковыми для пускового режима. Однако этот метод торможения, применявшийся ранее для двигателей резиновых валцов в случае аварийного торможения и для двигателей нерегулируемых прокатных станов в целях выталкивания из стана застрявшей раскатки, теперь почти оставлен в силу следующих причин: 1) противовключение синхронного двигателя вызывает сильные толчки тока в системе, большие, естественно, чем при пуске, так как двигатель в этом режиме идет против поля; 2) вследствие низкого $\cos \varphi$ в тормозном режиме тормозной момент получается сравнительно малым; 3) осложнение пусковой аппаратуры из-за требования отключения двигателя при $n=0$.

Более рациональным способом торможения синхронных двигателей является динамическое торможение, которое теперь обычно и применяется. Расход энергии при торможении получается меньше, чем в случае противовключения. Вместе с тем торможение получается более эффективным, чем при противовключении, если цепь возбуждения питается не от собственного возбудителя, а от отдельного источника постоянного тока. Степень быстроты торможения зависит от величины сопротивления, на которое замкнута статорная обмотка генератора. При собственном возбудителе, находящемся на валу синхронного двигателя, время торможения

получается значительно больше, так как при уменьшении скорости возбудителя падает ток возбуждения, что уменьшает тормозной момент и, следовательно, увеличивает время торможения. Динамическое торможение было применено в Америке к синхронному компенсатору мощностью в 15 000 kVA $2p=8$; 900 об/мин. Остановка была получена в течение 1 мин.

Рассмотрение закона изменения развиваемого двигателем при динамическом торможении тормозного момента в синхронном двигателе с явно выраженными полюсами значительно сложнее, чем при динамическом торможении асинхронной машины, обладающей неявно полюсной магнитной системой. Для рассмотрения этого вопроса отсылаем к литературе [Л. 88, 90, 91],

43. Механические характеристики коллекторных двигателей переменного тока

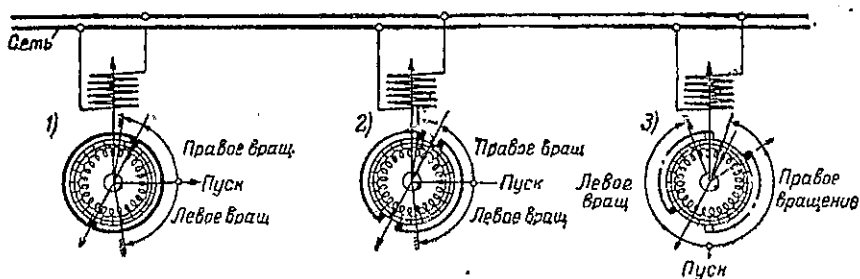
Число различных в электрическом отношении типов коллекторных двигателей переменного тока, предложенных изобретателями, чрезвычайно велико. Мы будем здесь касаться лишь тех типов коллекторных двигателей, которые нашли применение в промышленности, а именно:

- а) репульсионных двигателей типа Гутмана-Латурэ и типа Дери;
- б) трехфазных шунтовых коллекторных двигателей:
 - а) с возбуждением со статора;
 - б) с питанием через ротор типа Рихтера-Шраге;
- в) трехфазных последовательных двигателей:
 - а) с одним комплектом щеток;
 - б) с двумя комплектами щеток.

Репульсионные двигатели строятся до мощностей в 75 kW, 50 Гц и имеют нормальные пределы регулирования от 50 до 120% синхронной скорости. Стандартные трехфазные коллекторные двигатели строятся до мощностей в 150 kW с пределами регулирования от 50 до 150% синхронной скорости для шунтовых и от 50 до 120% для серийных. Отдельные трехфазные шунтовые двигатели имеют мощность в 400 kW, серийные в 600 kW. О больших пределах регулирования, лежащих для шунтовых машин иногда в пределах от 15 до 150% синхронной скорости и о каскадных установках, будет сказано далее.

Репульсионные однофазные и трехфазные последовательные двигатели по своим характеристикам относятся к серийным двигателям. Изменение скорости с нагрузкой в них зависит от насыщения. Поэтому зависимость между моментом и скоростью в них целесообразнее представлять графически, а не аналитически, как и в серийном двигателе постоянного тока.

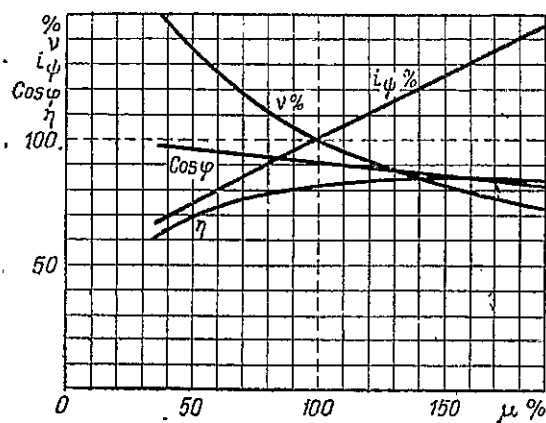
На фиг. 128 приведены три схемы репульсионных двигателей: 1) двигатель Томсона с одним комплектом щеток с соединением последних по диаметру; в промышленности применения не нахо-



Фиг. 128. Схемы включения репульсионных двигателей.

дит; 2) двигатель Гутмана-Латура с двумя комплектами щеток, соединенными по хордам. Оба комплекта щеток механически связаны и перемещаются вместе; 3) двигатель Дери с двумя комплектами щеток, из которых один неподвижен, а второй перемещается. Два последних двигателя имеют перед двигателем Томсона преимущество лучшей коммутации. Двигатель Гутмана-Латура

перед двигателем Дери имеет преимущество меньшей стоимости из-за большей простоты щеткодержателей и отсутствия гибкого кабеля между подвижными и неподвижными щетками, весьма неудобного для эксплуатации. В свою очередь двигатель Дери имеет плюс в отношении более точной регулировки. В двигателе Гутмана-Латура поворот на 1 механический градус соответствует p электрическим градусам.



Фиг. 129. Универсальная механическая характеристика репульсионного двигателя.

В двигателе Дери поворот на 1 механический градус соответствует, $p/2$ электрических.

На фиг. 129 представлена универсальная механическая характеристика репульсионного двигателя при неизменном положении щеток. Там же для полноты приведены кривые i_ϕ , η и $\cos \phi$. При сдвиге щеток момент репульсионного двигателя изменяется в зависимости от угла сдвига щеток α .

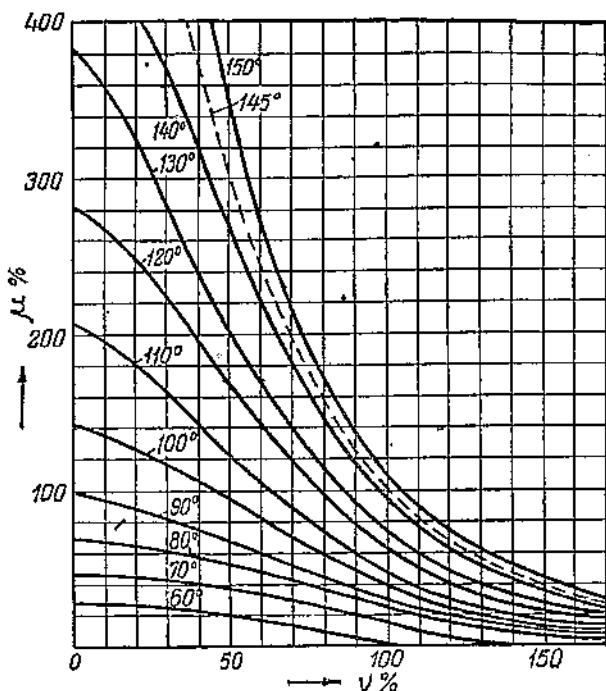
Момент двигателя

$$M = c \cdot I_a \cdot \Phi_a$$

В случае ненасыщенной машины

$$\Phi_s = c_1 I_1 \omega_s = c_1' I_1 \cdot \omega \cdot \sin \alpha, \quad (254)$$

где Φ_s — поток возбуждения; ω_s — число витков возбуждения, зависящее от угла сдвига щеток α и действительного числа витков статора машины ω ; I_1 и I_2 — токи в статоре и роторе.



Фиг. 130. Механические характеристики двигателей типа Гутмана-Латюра для разных углов сдвига щеток.

Так как

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\omega \cdot \cos \alpha}{\omega_2}$$

и

$$I_2 = c' I_1 \omega \cos \alpha,$$

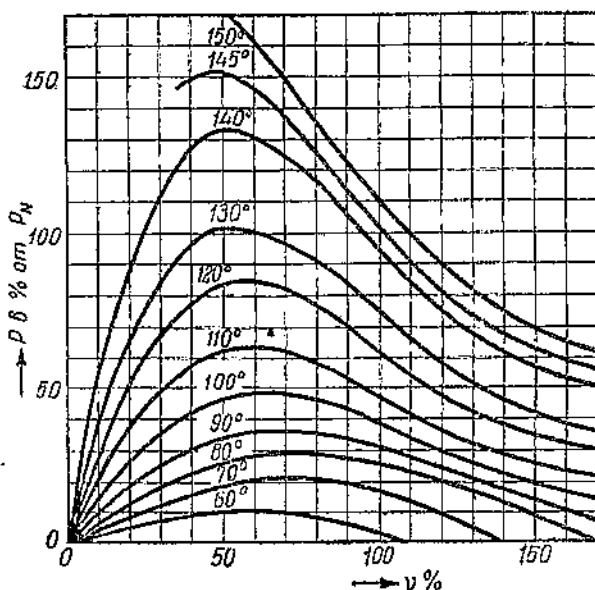
то в ненасыщенной машине

$$M = c'' \cdot I_1^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{c''}{2} \cdot I_1^2 \cdot \sin 2\alpha. \quad (255)$$

На фиг. 130 показаны механические характеристики двигателей типа Гутмана-Латюра для разных углов сдвига щеток (для дви-

гателей фирмы ВВС); на фиг. 131 даны зависимости мощности от скорости для тех же двигателей.

Трехфазные последовательные коллекторные двигатели как с одним комплектом щеток, так и с двумя могут выполняться двойным образом (фиг. 132): 1) в одном случае двигатель включается



Фиг. 131. Зависимость мощности от скорости для разных углов сдвига щеток двигателя типа Гутмана-Лагура.

на сеть через трансформатор (*a* и *a'*); 2) в другом случае двигатель включается на сеть непосредственно, но статор и ротор связываются промежуточным трансформатором (*b* и *d*). Включение двигателя на сеть через трансформатор с мощностью, обычно равной $\frac{1}{3}$ мощности двигателя, дает возможность изготовлять коллектор на пониженное напряжение. В случае малого насыщения трансформатор не оказывает практического влияния на работу двигателя и лишь при больших насыщениях сглаживает серпесную характеристику, чем предотвращает разнос двигателя при холостом ходе. Регулировка скорости достигается сдвигом щеток в сторону, противоположную направлению вращения ротора. Двойной комплект щеток дает более точную установку.

Механические характеристики двигателя с одним комплектом щеток без промежуточного трансформатора представлены на фиг. 133. Пунктирной линией отделены пределы устойчивости двигателя. На фиг. 134 представлены характеристики последователь-

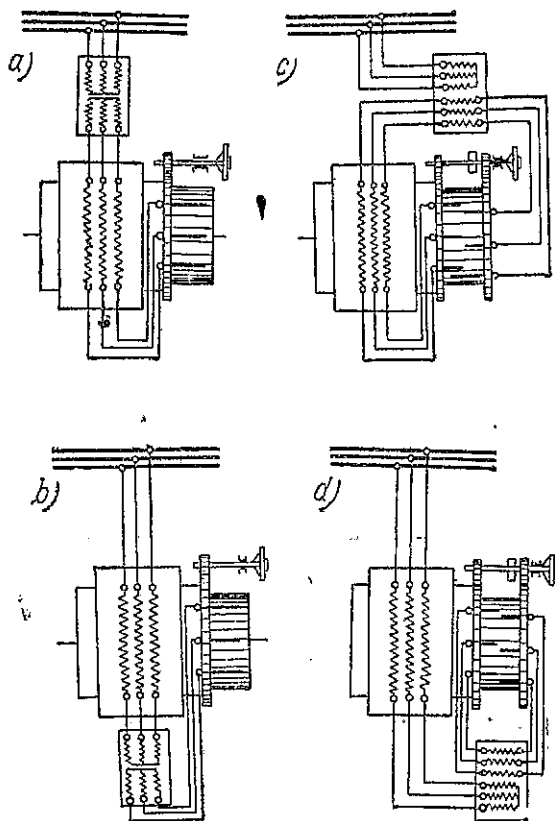
ных стандартных двигателей фирмы SSW. На фиг. 135 даны зависимости n от P при постоянном значении тока I для стандартных двигателей ГЭС. Значения токов в процентах указаны цифрами наверху кривых.

Из трехфазных шунтовых коллекторных двигателей на практике нашли применение два типа: 1) с питанием с ротора (Рихтера-Шраге) и 2) с питанием со статора в двух разновидностях:

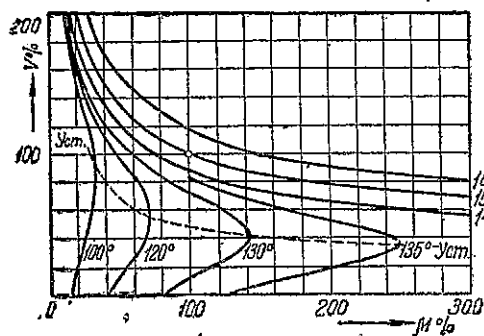
2а) с независимым трансформатором или автотрансформатором для ротора и

2б) Винтера-Эйхберга, в котором в качестве автотрансформатора использована статорная обмотка с комбинированным включением звезда-треугольник.

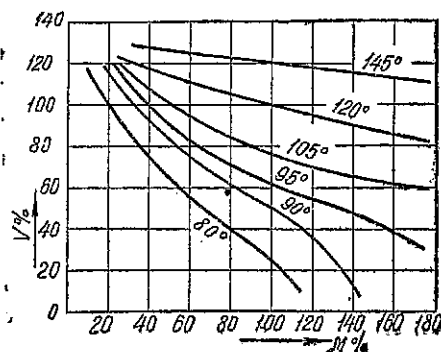
Схемы включений двигателей типов 1 и 2а представлены на фиг. 136 а, б. В двигателе типа Рих-



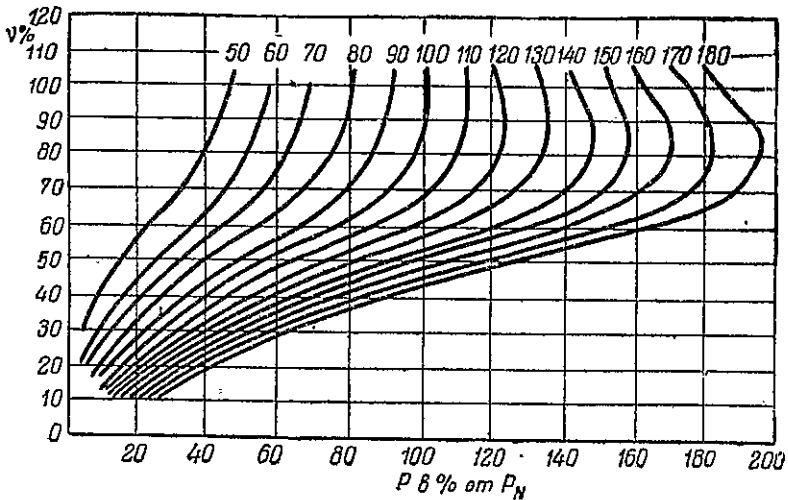
Фиг. 132. Схемы включения трехфазного серийного коллекторного двигателя.



Фиг. 133. Механические характеристики трехфазных серийных коллекторных двигателей.

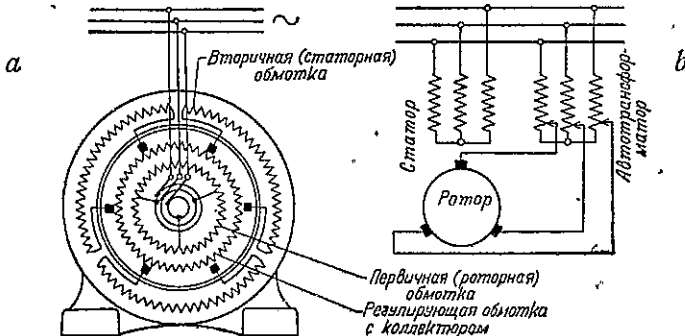


Фиг. 134. Характеристики стандартных трехфазных последовательных двигателей SSW.



Фиг. 135. Зависимость η от P при $I = \text{const}$ для двигателей СЕС.

тера-Шраге регулировка скорости, как известно, достигается сдвигом щеток, благодаря чему в обмотку статора кроме э. д. с., индуктированной от потока ротора, вводится добавочная э. д. с. того или другого направления от вспомогательной обмотки ротора. Двигатель на большом диапазоне имеет шунтовую харак-



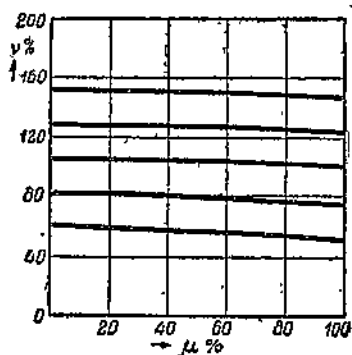
Фиг. 136. Включение трехфазных шунтовых коллекторных двигателей:

a — с возбуждением с ротора; b — с возбуждением со статора.

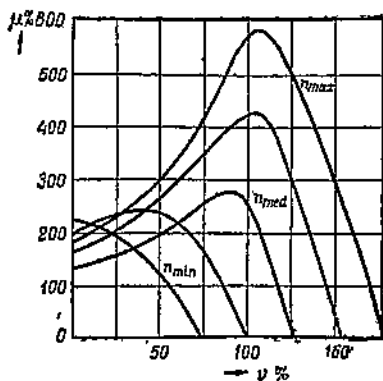
теристику. Так, на фиг. 137 представлены механические характеристики двигателя Шраге при нормальной работе для различных углов сдвига щеток.

Так как двигатель Шраге является по существу асинхронной машиной, то он имеет опрокидывающий момент для всех положе-

ний щеток. На фиг. 138 показано изменение момента от скорости для разных положений щеток для двигателя мощностью в 40 kW. Из них видно, что со снижением скорости уменьшается и опрокидывающий момент. Так, согласно фиг. 138, максимальный



Фиг. 137. Механические характеристики двигателя Шраге.

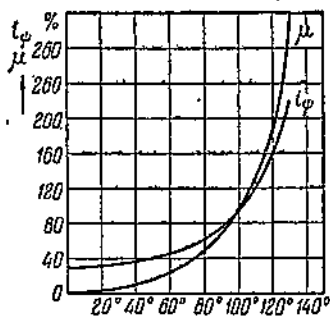


Фиг. 138. Полные механические характеристики двигателей Шраге.

момент при наибольшей скорости равен 580% номинального, при средней — около 280% и при наименьшей всего 210%. Как и вообще в трехфазных асинхронных машинах, перегрузочный момент для генераторного режима выше такового для двигательного режима.

На фиг. 139 показано изменение пускового момента и пускового тока двигателя в зависимости от угла сдвига щеток. Из него видно, что наиболее целесообразным положением для пуска является положение щеток, соответствующее минимальной скорости ($\alpha = \pm 90^\circ$).

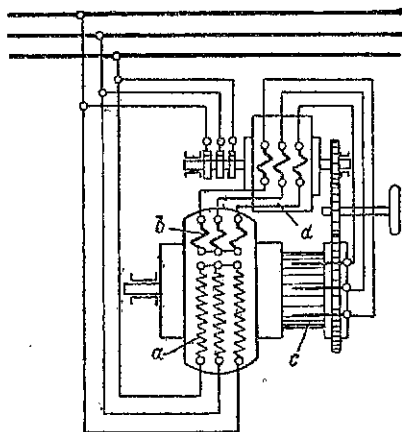
Нормальными пределами регулировки двигателя Шраге следует считать отношение 1:3. Фирма SSW считает, что путем увеличения модели эти пределы могут быть расширены до отношения 1:8. Однако снижение скорости до самого низшего предела по условиям нагрева может производиться лишь на очень короткий промежуток времени и с сильным снижением момента. Поэтому на практике такие пределы регулировки двигателя Шраге применения почти не нашли. Нормальные типы этих двигателей строятся на мощности 1,8—150 kW.



Фиг. 139. Изменение пусковых тока и момента двигателя Шраге в зависимости от положения щеток.

Схема трехфазного шунтового коллекторного двигателя с возбуждением со статора представлена на фиг. 136б. Подобный тип двигателя широкого применения в промышленности не нашел, так как практически он не давал плавной регулировки.

Хотя с подобными двигателями можно получать широкую регулировку, однако вследствие дороговизны и некоторой громоздкости (вместе с аппаратурой) они применения на практике почти не нашли. Их использовали для металлообрабатывающих станков с пределами регулировки от 1:3 до 1:5 при 4—12 ступенях скорости. В 1929 г. фирмой AEG был предложен особый коллекторный шунтовой двигатель с возбуждением со статора (тип ONP). Схема его приведена на фиг. 140. В этой схеме совместно

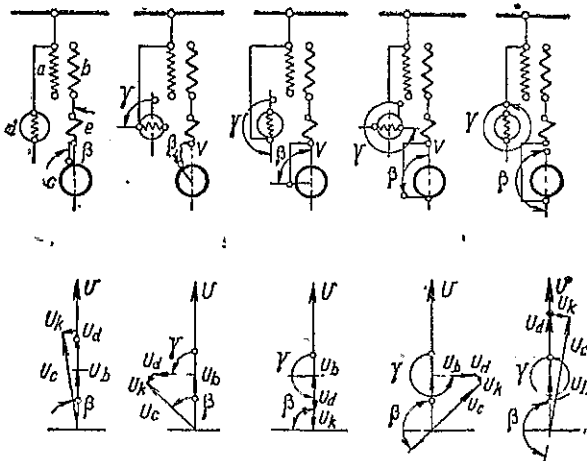


Фиг. 140. Схема двигателя ONP фирмы AEG.

с двигателем включается регулятор фазы (*d*) малой мощности. Конструктивно регулятор располагается над двигателем в общем корпусе. Вторичная обмотка регулятора фазы (*d*) включается последовательно со щетками ротора (*c*) и с дополнительной обмоткой (*b*) на статоре главного двигателя. Одновременно с поворотом вторичной обмотки регулятора происходит и поворот щеток посредством шестеренной передачи. Двигатель работает при неизменном магнитном потоке. Поданное на ротор двигателя напряжение суммируется из двух составляющих: 1) первая составляющая—это неизменное по величине и фазе напряжение добавочной обмотки статора (*b*) и 2) вторая составляющая от регулятора фазы, неизменная по величине и переменная по фазе. Геометрическое сложение двух указанных напряжений и дает результирующее напряжение, подведенное к ротору. Так как эти два напряжения примерно равны по величине и так как ротор регулятора фазы может поворачиваться на 360° , то результирующее напряжение можно плавно менять от максимальной величины при низшем числе оборотов в минуту через нуль при синхронизме и снова до максимума при высшей скорости. Пояснение дает фиг. 141, где показано положение щеток, поворот ротора регулятора фазы и векторные диаграммы напряжения.

На нем *a*—главная обмотка статора; *b*—добавочная обмотка статора; *d*—первичная обмотка регулятора фазы; *e*—его вторичная обмотка; *c*—обмотка ротора двигателя; U —напряжение сети; U_b —напряжение добавочной обмотки статора; U_d —вторичное напряжение регулятора фазы; U_c —индуктированная в роторе дви-

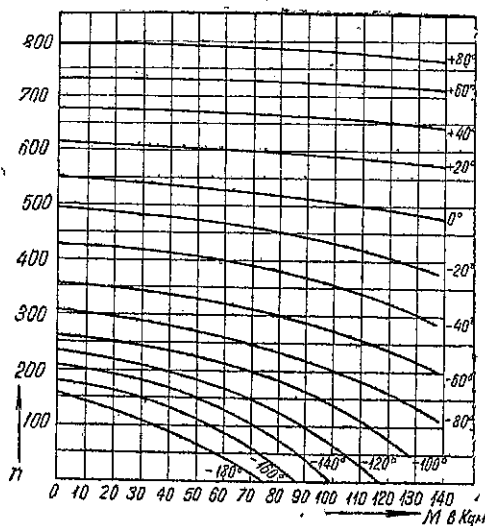
гателя э. д. с.; U_k — компенсационное напряжение двигателя; β — угол сдвига щеток в электрических градусах относительно положения короткого замыкания; γ — угол поворота регулятора фазы в электрических градусах относительно положения максимума напряжения. Для того чтобы оба напряжения U_b и U_d одновременно были в фазе или были направлены навстречу напряжению, индуктированному в



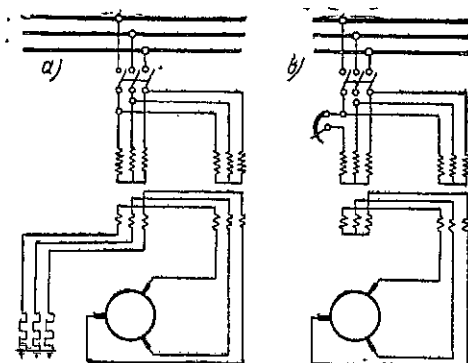
Фиг. 141. Схема регулирующего процесса двигателя АЕГ.

роторе двигателя, поворот щеток производится одновременно с поворотом регулятора фазы на нужный угол. В целях получения около синхронизма высокого $\cos \varphi$ напряжения добавочной обмотки статора и регулятора фазы взяты не совсем равными. Остаточное напряжение и создает нужную компенсацию $\cos \varphi$. Компенсация $\cos \varphi$ при скорости выше и ниже синхронной достигается с помощью надлежащего выбора передаточного числа между регулятором и щетками. Оно взято таким, что при перемещении регулятора щетки соответственно опережают (при ниже синхронной скорости) или отстают от него (при выше синхронной скорости). При таких условиях получается высокий $\cos \varphi$ при всех скоростях.

Этот тип двигателя имеет то преимущество перед двигателем, питаемым с ротора, что он может быть выполнен на любое рациональное для электрических машин напряжение сети, тогда как для первого максимальное напряжение ограничено 500 V. Подобные двигатели выполнялись фирмой АЕГ до мощностей в 300 kW

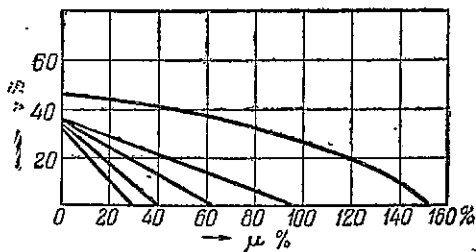


Фиг. 142. Механические характеристики двигателя АЕГ мощностью 150/750 об/мин.



Фиг. 143. Схемы для расширенной регулировки шунтового двигателя:

a — с сопротивлением в роторе; *b* — с сопротивлением в статоре.



Фиг. 144. Характеристики двигателя АЕГ с добавочным сопротивлением.

с нормальными пределами регулировки 1:3 ($\pm 50\%$ от синхронной скорости). В отдельных случаях путем удорожания двигателя можно пределы регулировки повышать до цифры 1:5. Расширение пределов регулировки идет лишь в сторону снижения ниже половины синхронной скорости, т. е. с ухудшением вентиляции и использования машины, так как переход за 150% синхронной скорости недопустим по условиям коммутации.

Характеристики двигателя мощностью 85 kW, 750 об/мин при регулировке скорости в пределах 150/750 об/мин представлены на фиг. 142. Для всех пределов регулировки они дают нормальную шунтовую характеристику.

В тех случаях, когда желательно на короткий промежуток времени снижать скорость до $\frac{1}{10}$ номинальной, что бывает нужно в каландрах, ситцепечатных машинах, пермоточных станках и других машинах бумажной и текстильной промышленности, приходится в цепь ротора (фиг. 143а) или в цепь статора (фиг. 143б) вводить добавочное сопротивление. Переход от пониженного числа оборотов в минуту к повышенному производится простым замыканием сопротивления. Понятно, что при этом двигатель компаундируется, а характеристики его принимают вид фиг. 144.

44. Торможение коллекторных двигателей переменного тока

Коллекторная машина переменного тока принципиально может работать в тех же режимах торможения, что и остальные типы электродвигателей, а именно: а) в режиме противовключения; б) генератором с рекуперацией энергии на сеть; в) в режиме динамического торможения, т. е. самовозбужденным генератором или генератором независимого возбуждения на отдельное сопротивление. Однако самовозбуждение коллекторных машин переменного тока имеет такие особенности, что режим динамического торможения с самовозбуждением практически неприменим, и мало того, при работе машины на сеть в тормозном режиме приходится, наоборот, принимать меры к тому, чтобы машина не возбуждалась. Это обстоятельство заставляет нас остановиться на явлении самовозбуждения коллекторных машин с физической стороны несколько подробнее.

Основным условием самовозбуждения коллекторной машины является наличие магнитного поля хотя бы от остаточного магнетизма. Поле, создаваемое отдельными катушками машины, может быть равно нулю, однако для получения самовозбуждения результирующее магнитное поле всегда должно существовать не в одной фазе, так в другой. Степень возбуждения, т. е. то напряжение, до которого возбуждается машина, определяется характеристикой холостого хода и прямой сопротивлений цепи возбуждения, как и в машине постоянного тока.

Частота тока самовозбуждения машины определяется соотношением величин всех реактивных составляющих э. д. с. замкнутого контура. В случае динамического торможения самовозбуждение машины должно быть основано на остаточном магнетизме.

При ненасыщенной магнитной системе остаточный магнетизм настолько мал, что машина часто не возбуждается. Насыщение машины или электромагнитного механизма, входящего в цепь машины, может дать устойчивость возбуждения. Однако вследствие переменной величины остаточного магнетизма возбуждение возникает не всегда и не при одних и тех же скоростях, что делает динамическое торможение ненадежным, а следовательно, для практики почти непригодным. Например, машина может не самовозбудиться при спуске тяжелого груза, в результате чего груз будет быстро падать, что в свою очередь будет вызывать непрерывную работу предохранительного тормоза.

Вместе с тем самовозбуждение коллекторных машин переменного тока происходит исключительно бурно, что связано с механическим толчком на рабочую машину. При больших сопротивлениях в цепи машина не возбуждается, при малых сопротивлениях возбуждение может быть таково, что на машине появится круговая огонь.

Все эти обстоятельства ведут к тому, что динамическое торможение коллекторных машин переменного тока на практике не

применяется ввиду их „капризности“ в этом отношении вследствие сложности компенсации поля якоря и вследствие необходимости в добавочных сопротивлениях.

Однако вопрос самовозбуждения этих машин имеет значение для практики еще и в другом отношении. Для торможения коллекторной машины по принципу противовключения производится передвижение щеток машины в сторону, соответствующую обратному направлению вращения. Но именно при этом машина может начать работать на сеть как самовозбужденный генератор. Какой режим при этом будет получаться, зависит от угла сдвига щеток, добавочного сопротивления и, наконец, параметров цепи. При малом сопротивлении в цепи машина самовозбуждается, так как здесь этому (в отличие от динамического торможения) способствует намагничивание от внешнего источника. Однако рекуперация энергии при самовозбуждении оказывается затруднительной, так как машина самовозбуждается вообще с числом периодов, отличным от числа периодов сети. Внешняя цепь представляет для коллекторной машины цепь короткого замыкания, и самовозбуждение машины происходит с малым числом периодов, протекает весьма бурно и равносильно короткому замыканию машины. Поэтому его приходится избегать.

Нужно иметь в виду, что основным условием самовозбуждения коллекторных машин является наличие вращающегося поля эллиптического или кругового. Так как в некоторых типах двигателей при переходе от одной скорости к другой поле меняется с кругового на эллиптическое, то соответственно меняется и частота. Общего правила для определения числа периодов самовозбуждения коллекторной машины дать нельзя.

Интересно отметить, что у самовозбуждающегося коллекторного генератора направление вращения поля может и совпадать с направлением вращения якоря и быть направленным ему навстречу. В отношении самовозбуждения различные коллекторные машины переменного тока ведут себя неодинаково. Так, трехфазная шунтовая машина, работая на сеть, будет лишь рекуперировать энергию. В самом деле, для самовозбуждающегося шунтового генератора внешняя сеть будет представлять цепь короткого замыкания. Если бы машина самовозбудилась, то ток в обмотке возбуждения при коротком замыкании машины был бы равен нулю (фиг. 145). Отсюда следует, что самовозбуждение шунтовой машины при работе на сеть невозможно. В ней не может иметь место одновременная работа на сеть генератором с самовозбуждением и с независимым возбуждением. Однако при отключенной сети шунтовая машина будет продолжать работать самовозбужденным генератором с частотой, несколько отличной от частоты сети. При включении на сеть машина снова приобретет частоту сети. Все это делает вполне возможным рекуперацию энергии трехфазной шунтовой коллекторной машиной на сеть с синхронными генераторами.

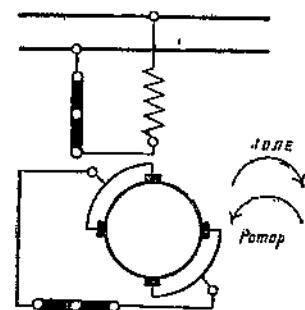
Совершенно иначе обстоит дело с трехфазной последовательной машиной. Внешняя цепь (сеть) является цепью короткого замыкания и для нее, но здесь обмотка возбуждения включена между якорем и участком короткого замыкания. Поэтому серийная машина будет самовозбуждаться и притом очень бурно с малым числом периодов. Для предотвращения самовозбуждения необходимо включение в цепь машины добавочного сопротивления. Величина его зависит от угла сдвига щеток и коэффициента трансформации между статором и ротором. Понятно, что введение добавочного глушащего сопротивления снижает к. п. д. системы.

Глушащее сопротивление должно быть тем больше, чем меньше насыщение машины. Лишь с введением этого сопротивления трехфазная последовательная машина может работать в качестве генератора с возбуждением от сети и с отдачей энергии обратно в сеть. В целях надежности торможения необходимо сначала вводить в цепь статора сопротивление и лишь затем перемещать щетки в положение генерирования, т. е. в положение обратного направления вращения.

После всех изложенных предпосылок перейдем к рассмотрению тормозных характеристик главнейших типов коллекторных двигателей, применяемых в промышленности.

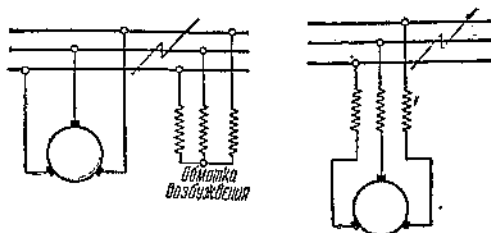
Из изложенного выше ясно, что торможение репульсионного двигателя (фиг. 146) может происходить или в режиме противовключения или в режиме генератора с независимым возбуждением (фиг. 145). Использование самовозбуждения здесь невозможно, наоборот, его нужно тушить, вводя в цепь глушащее сопротивление.

Фиг. 143. Включение репульсионного двигателя для торможения.



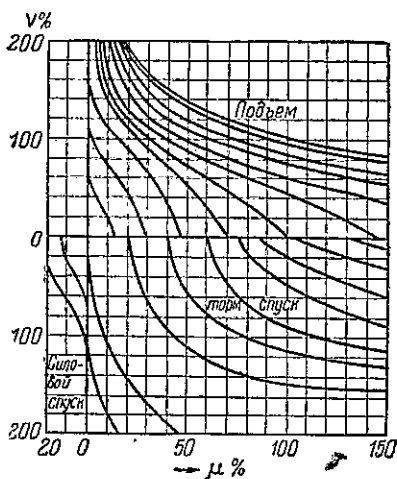
Эти два режима торможения аналогичны таковым для серийного двигателя постоянного тока: а) при работе по принципу противовключения; б) при работе с параллельным соединением якоря и обмотки возбуждения.

Двигательные и тормозные характеристики репульсионного двигателя для крановой схемы представлены на фиг. 147. Как видно, они идут сравнительно плоско и в этом отношении не уступают плавности характеристик двигателей серийных постоянного тока.



Фиг. 145. Включение трехфазных коллекторных машин на сеть.

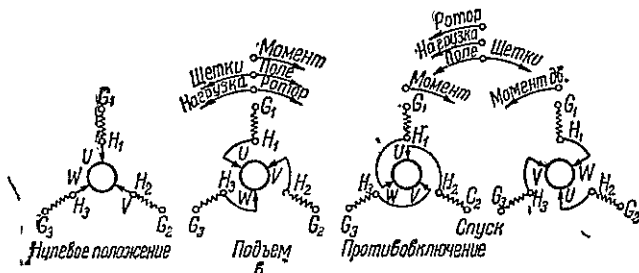
В отношении тормозных характеристик шунтовой трехфазный коллекторный двигатель подобен шунтовому двигателю постоянного тока. При переходе через скорость идеального холостого хода он начинает работать генератором. Однако в этом отношении трехфазный шунтовой коллекторный двигатель имеет то преимущество перед шунтовым, что в нем имеется широкая возможность менять число оборотов идеального холостого хода простым сдвигом щеток при возбуждении с ротора и изменением коэффициента трансформации при возбуждении со статора. Однако это преимущество условное, так как если мы хотим сравнивать коллекторный шунтовой двигатель с двигателями постоянного тока, то должны сравнивать его с регулируемым шунтовым двигателем постоянного тока, у которого число оборотов идеального холостого хода может изменяться в пределах 1:3 и 1:4.



Фиг. 147. Двигательные и тормозные характеристики репульсионного двигателя для крановой схемы.

Коллекторный двигатель переменного тока дает такие же возможности.

Форма тормозных кривых шунтовой машины при рекуперативном режиме примерно одинакова с формой двигательных (фиг. 138). Однако, как и у обыкновенных асинхронных машин, перегрузочные моменты в генераторном режиме выше, чем в двигательном.



Фиг. 148. Положение щеток в трехфазном подъемном двигателе при спуске и подъеме.

Торможение серийных трехфазных коллекторных двигателей, как ясно из предыдущего, в основном может происходить двумя путями: а) по принципу противовключения; б) работой генератором с независимым возбуждением. При этом, как и всегда, нужно

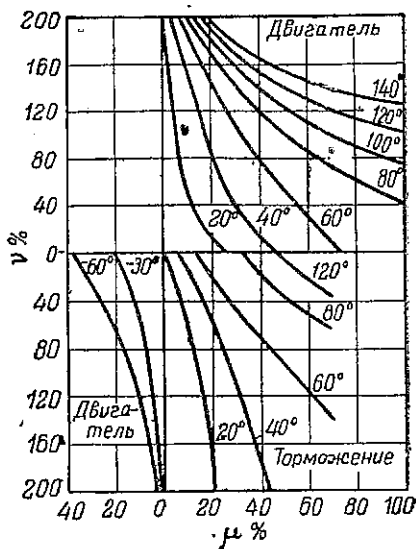
иметь в виду, что получение режима работы машины по первому или второму принципу зависит от скорости, положения щеток, а иногда и добавочного сопротивления, введенного в цепь.

Вопросы торможения наиболее важны в подъемных и транспортных сооружениях. На фиг. 148 дано положение щеток для различных условий работы подъемного двигателя. Там же указаны стрелками направления вращения ротора, поля статора, направление сдвига щеток и направления моментов нагрузки и двигателя.

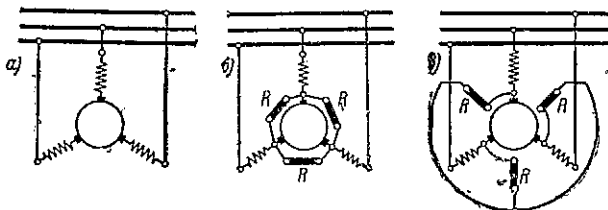
Двигательные и тормозные характеристики двигателя для торможения по принципу противовключения даны на фиг. 149.

Как видно, эти характеристики являются не вполне удовлетворительными вследствие большой крутизны тормозных кривых. Правда, они одинаковы с тормозными кривыми асинхронного двигателя в режиме противовключения, что и естественно, так как мы имеем по существу режим, аналогичный таковому в асинхронной машине, только в последней регулировка достигается сопротивлением в цепи ротора, а в коллекторной машине — сдвигом щеток.

Тормозные и рабочие характеристики могут быть изменены, если мы между щетками коллектора введем сопротивление. Эти последние могут быть соединены в звезду или в треугольник



Фиг. 149. Двигательные и тормозные характеристики трехфазного последовательного двигателя.

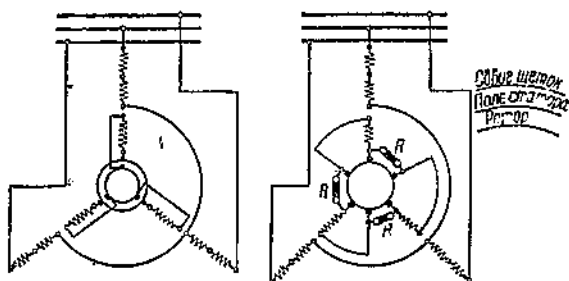


Фиг. 150. Видоизменение схемы для варьирования рабочих и тормозных характеристик последовательного двигателя.

(фиг. 150). Понятно, что введением этого переменного или постоянного сопротивления R мы нарушаем соотношение между токами статора и ротора, т. е. нарушаем компенсацию между ампервитками статора и ротора. Это обстоятельство изменяет свойства

машины, и мы получаем условия, аналогичные таковым при шунтировке якоря в серийном двигателе постоянного тока.

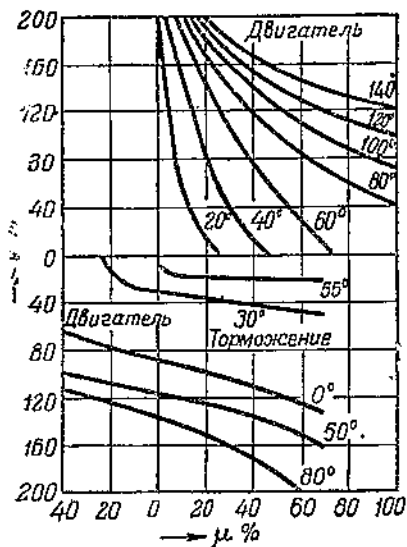
В этом случае в зависимости от сопротивления между щетками, положения щеток и скорости машина может работать на



Фиг. 151. Включение трехфазного последовательного двигателя для торможения.

сеть или двигателем или генератором при независимом возбуждении. Сдвигая щетки, мы меняем фазу ампервитков, имевшую место в двигателе, и следовательно, можем варьировать режим машины. В рассматриваемых условиях ротор и поле статора вращаются в одном и том же направлении.

Рассмотрим также тормозные характеристики для двигателя с трансформаторной связью статора и ротора и с двойным комплектом щеток. Положение щеток и направление сдвига щеток и вращения поля статора и ротора представлены на фиг. 151. В нем для случая спуска груза, когда необходимо торможение, между подвижными и неподвижными щетками включается сопротивление R для получения плоских характеристик, т. е. для изменения числа оборотов идеального холостого хода для независимого возбуждения и плавного перехода из генераторного (тормозного) режима в двигательный.



Фиг. 152. Двигательные и тормозные характеристики для схемы фиг. 151.

Двигательные и тормозные характеристики для этого случая включения представлены на фиг. 152.

Как видно из фиг. 152, тормозные кривые почти совершенно подобны характеристикам серийного двигателя постоянного тока с параллельным включением якоря и обмотки возбуждения и шунтировкой якоря, что и естественно, так как в данном случае благодаря определенному положению щеток и параллельному сопротивлению происходит автоматическое изменение магнитного потока двигателя.

ГЛАВА V

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ И НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

45. Практическое значение изучения переходных режимов и нагрузочных диаграмм электроприводов

Работа электропривода, приводящего в движение тот или иной исполнительный механизм, характеризуется так называемыми нагрузочными диаграммами. Под ними понимаются зависимости вращающего момента двигателя, его мощности, тока, скорости и пройденного механизмом пути от времени. Таким образом нагрузочными диаграммами будут зависимости

$$-[M, P, I, n, L=f(t)].$$

Нагрузочные диаграммы в зависимости от вида функции представляются аналитически или графически и характеризуют собой по существу переходные режимы электропривода. Под последними понимаются процессы перехода от одного состояния электропривода к другому, т. е. режимы перехода от покоя к вращению или обратно, от одной скорости к другой, от одного направления вращения к другому, от одной нагрузки исполнительного механизма к другой и т. д. Переходные режимы играют огромную роль в работе электропривода и исполнительного механизма и являются главнейшей составной частью теории электропривода. Именно при рассмотрении этих режимов выявляются особенности совместной работы двигателей и исполнительных механизмов.

Каждый исполнительный механизм предъявляет к электроприводу определенные, часто весьма жесткие требования в отношении длительности и других условий пуска, торможения, изменения скорости с нагрузкой, регулирования скорости и т. п. Расчеты переходных режимов выявляют, как намечаемый двигатель может удовлетворить поставленным условиям. В результате анализа переходных режимов можно выбрать необходимые для каждого отдельного случая механические характеристики двигателя, подобрать соответствующую передачу от двигателя к рабочей машине, выбрать аппаратуру для управления двигателем в целях получения от него необходимых свойств при пуске, работе и остановке.

Лишь нагрузочные диаграммы, полученные расчетом переходных режимов привода, дают возможность правильно выбирать необходимую для данного исполнительного механизма мощность и тип двигателя.

Число исполнительных механизмов, для которых характер протекания переходных процессов электропривода мало существенен, крайне ограничено. Сюда можно отнести лишь некоторые из весьма редко пускаемых механизмов длительного режима работы, а также те рабочие машины, в которых производственный процесс настолько груб, что не требует от электропривода особой точности (например, дробление камня, разминание глины и т. п.): В большинстве же рабочих машин и даже во время пуска машин, выполняющих тот или иной производственный процесс, характер протекания переходных режимов электропривода имеет существенное значение.

Прежде всего производственный процесс должен совершаться, по возможности, в кратчайший срок, чтобы данный исполнительный механизм давал максимальную производительность. Это обстоятельство приобретает особо важное значение в условиях шахановского движения. Во многих случаях производительность исполнительных механизмов зависит от длительности пусковых и тормозных режимов. В свою очередь конструкция исполнительного механизма, а часто и сам производственный процесс предъявляют определенные требования в отношении максимальных допустимых ускорений, а часто и в отношении плавности пуска и торможения. Превышение допустимых для механизма ускорений может повести к механическим перенапряжениям и даже поломке механизмов или порче продукта, а тем самым к снижению производительности (текстильные, бумажные, полиграфические машины, станы холодной прокатки и т. д.). В ряде случаев величины допустимых ускорений весьма существенны и с точки зрения безопасности (например, шахтные подъемники, лифты). Указанные выше обстоятельства предъявляют особые требования к форме кривой моментов и допустимым максимумам вращающего момента электродвигателей. Вместе с тем задача получения оптимальных ускорений связана с известными требованиями к кинематической связи между двигателем и исполнительным механизмом, а именно — с требованием выбора наиболее выгодного передаточного числа.

В электроприводах, работающих большую часть времени в переходных режимах (на механизмах повторно-кратковременного режима работы), существенную роль играет расход энергии в периоды пуска и торможения. Очевидно, что этот расход энергии должен быть, по возможности, сведен к минимуму.

Отсюда совершенно ясно все огромное практическое значение изучения переходных режимов и нагрузочных диаграмм. Оно дает возможность выявить детальное поведение электропривода в целях правильного его выбора и расчета и дает возможность достигнуть

наибольшей производительности исполнительных механизмов и наилучшего использования электродвигателей.

Анализ переходных режимов выявляет необходимость видоизменения конструкции исполнительных механизмов, выясняет в ряде случаев необходимость видоизменения параметров электрических машин конструкторами при расчете машин или видоизменении механических характеристик проектировщиками автоматических схем управления путем воздействия на двигатель элементами автоматической аппаратуры. Детальный анализ переходных режимов дает возможность выбирать для каждого исполнительного механизма оптимальное сочетание механических (рабочих и тормозных) характеристик электродвигателей. Теоретическое и экспериментальное исследование переходных режимов позволяет выявить наиболее совершенные принципы автоматизации пуска и торможения двигателей с точки зрения наилучшего использования последних и наиболее благоприятных условий для работы кинематических схем исполнительных механизмов.

В силу исключительного разнообразия исполнительных механизмов и большого числа основных электрических типов двигателей (постоянного тока, переменного, шунтовой, серийный, компаундный, синхронный, асинхронный и др.) число возможных вариантов переходных режимов чрезвычайно велико.

46. Характер статического момента различных исполнительных механизмов

Очевидно, что поведение электропривода с исполнительным механизмом зависит от свойств как одного, так и другого. Для классификации переходных режимов нужно знать механические свойства тех и других. Механические свойства двигателей, отражаемые их механическими характеристиками, разобраны в гл. IV. Здесь же мы коснемся основного подразделения различных исполнительных механизмов по их механическим свойствам.

Совершенно ясно, что разделение, проведенное по отраслям промышленности, по свойствам обрабатываемых материалов, по производственным процессам, не будет отвечать целям поставленной задачи. Методика расчета электропривода отдельных механизмов, положим, текстильной промышленности может совпадать с таковой для некоторых механизмов металлургической промышленности, методика расчета для механизмов нефтяных промыслов — с методикой расчета для механизмов шахт и т. д. Поэтому подразделение исполнительных механизмов мы произведем по характеру изменения статического момента в зависимости от некоторых факторов.

Факторами, которые в различных производственных машинах при заданном продукте могут влиять на статический момент, будут: скорость, путь и время. Очевидно, что влияние скорости связано с характером ведения производственного процесса и ча-

стично со свойствами исполнительного механизма. Влияние пути связано в первую очередь с кинематикой исполнительного механизма или его расположением в определенном месте. Влияние времени получается часто из-за характера производственного процесса, из-за переменных свойств обрабатываемых материалов. В отношении возможного характера изменения статического момента все исполнительные механизмы могут быть разделены на пять классов.

I класс. Сюда входят такие механизмы, в которых статический момент практически остается постоянным. Усилие, требующееся для производственной работы при данном полуфабрикате, изделия, не меняется. В качестве типичного примера могут быть взяты двигатели подъемного крана. Подвешенный к крюку груз G во время его подъема и спуска не меняется. Статический момент на подъемном барабане, равный произведению груза на радиус барабана, остается неизменным.

Усилие, требуемое для передвижения моста или тележки крана при определенном грузе на крюке, также не меняется, ибо оно зависит от веса моста или тележки и коэффициентов трения скольжения и качения. Поэтому нормальный мостовой кран относится к числу механизмов с постоянным статическим моментом.

Такой же характер статического момента будет у конвейера непрерывного транспорта с постоянным количеством груза на погонный метр транспортирующей ленты, ибо опять-таки требуемый от двигателя момент определяется постоянным весом груза и постоянными коэффициентами трения.

По аналогичным соображениям сюда же нужно отнести большинство прокатных станков, хотя моменты прокатки от пропуска к пропуску непрерывно меняются, и мы имеем постоянное чередование пропусков и пауз. За время одного пропуска металла через валки усилие, требующееся для деформации металла, остается практически неизменным.

К числу механизмов с постоянным моментом нужно отнести также строгальный станок, у которого за каждый ход стола статический момент остается практически постоянным, один для прямого хода, другой для обратного. Ряд других механизмов с $M_m = \text{const}$ перечислен в графе I табл. VIII.

II класс. К этому классу мы относим механизмы, у которых статический момент зависит от скорости. Это относится к таким рабочим машинам, в которых процесс работы определяется в основном центробежными усилиями. Типичным примером является вентилятор. Усилия, необходимые для всасывания или нагнетания воздуха, пропорциональны квадрату скорости. Так как к этим усилиям добавляется трение в подшипниках, дающее постоянную составляющую момента M_0 , то статический момент вентилятора

$$M_g = M_0 + c \cdot n^2. \quad (256)$$

Аналогичными свойствами обладает центробежный насос. В нем

$$M_n = M_1 + c_1 \cdot n^3,$$

где M_1 определяется тем статическим напором, который должен преодолеть центробежный насос. Отметим, что, как видно будет из дальнейшего, поршневой насос к данному классу механизмов не относится, несмотря на то, что конечная производственная задача обоих указанных механизмов одинакова. В центробежном насосе подача воздуха происходит за счет центробежных усилий, в поршневом насосе — за счет сжатия. Таким образом производственное назначение механизма еще не определяет полностью во всех случаях характера статического момента.

К механизмам со статическим моментом, зависящим от скорости, относится гребной винт, производящий в воде работу, аналогичную той, которую вентилятор производит в воздухе.

Сюда же должен быть отнесен, например, порталый кран, которому вследствие больших его габаритов воздух при движении оказывает сопротивление, зависящее от скорости.

Сюда же включается текстильный мех. анимз — банкаброш, задача которого заключается в вытяжке и крутке ровницы. Повышение скорости вызывает добавочные

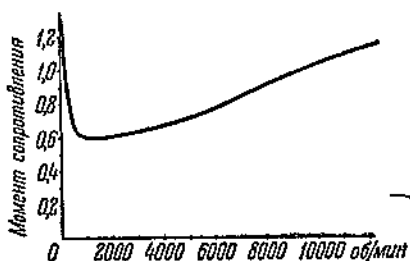
сопротивления, связанные с трением о воздух. Форма кривой статического момента для банкаброша показана на фиг. 153.

В этот же класс входят центрифуги разных отраслей промышленности (химической, сахарной, металлообрабатывающей, текстильной), служащие для выделения жидкости из твердых тел или для разделения жидкостей разных плотностей.

В общем случае в разных рабочих машинах возможны самые разнообразные зависимости статического момента от скорости. Блап'ом в свое время предложено уравнение зависимостей статического момента от скорости, в которое укладываются все возможные практически варианты II класса

$$M_m = M_0 + (M_N - [M_0]) \left(\frac{n}{n_N} \right)^{\alpha} - 1, \quad (257)$$

где M_0 — постоянный момент трения при номинальной нагрузке; M_N — момент рабочей машины при номинальной нагрузке; α — коэффициент, показывающий характер изменения момента от скорости. Практически α может изменяться от 1 до 3 и в общем случае иметь как целые числа, так и дробные. Однако при очень



Фиг. 153. Зависимость статического момента банкаброша от скорости.

высоких скоростях механизмов, достигающих иногда до 10 000—20 000 оборотов двигателя в минуту, величина α , как показывает опыт, доходит до величины, равной 6.

Названия наиболее типичных механизмов II класса сосредоточены во втором столбце табл. VIII.

III класс. К нему относятся механизмы, у которых статический момент зависит от пути. Этот класс механизмов исключительно многочисленный. Далеко не полный, конечно, список приведен в третьем столбце табл. VIII. Укажем здесь лишь несколько примеров. Так, в ножницах для резки металла момент изменяется в зависимости от угла кривошипа согласно кривой фиг. 66, приведенной выше. Там же были выяснены причины этого изменения по условиям кинематики механизмов с кривошипными передачами. Сюда же следует отнести поршневые машины, нагрузка которых меняется в зависимости от хода поршня, ткацкий станок (фиг. 25). В класс III включается большое количество различных ножниц, прессов, ковочных и гибочных машин. Из табл. VIII видно также, что шахтные подъемники в зависимости от их конструкции могут относиться как к классу I, так и III. Во многих случаях зависимости $M_m = f(L)$ аналитически выражены быть не могут. Тогда они представляются графически.

IV класс. Этот класс включает механизмы, в которых статический момент зависит как от скорости, так и от пути. В качестве типичного примера этого класса следует считать электрический транспорт—электровозы, трамваи. При движении трамваев или электропоездов по рельсам подвижным составом испытываются сопротивления разного рода:

1. Силы трения, зависящие от тяжести груза, неизменного для каждого перегона.

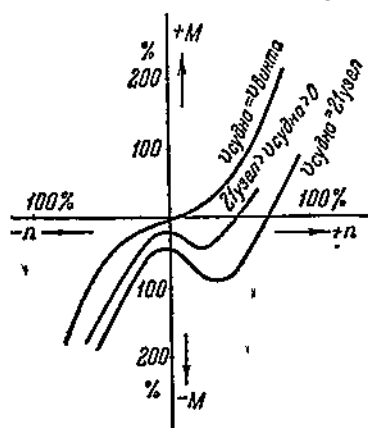
2. Добавочные силы трения колес о реборды на кривых, стрелках. Очевидно, что эти силы являются уже функцией пройденного составом пути.

3. Собственно силы тяжести, положительные при подъеме поездов по уклону, отрицательные при спуске. Эти силы появляются опять-таки в зависимости от пройденного составом расстояния.

4. Наконец, силы сопротивления движения поезду воздуха, целиком зависящие от скорости движения. Таким образом в данном случае $M_m = f(v, L)$. В зависимости от типа механизма характеристика M_m в этом классе может представляться графически или аналитически.

В этот же класс входит при некоторых условиях и гребной винт. При установившейся скорости судно идет в соответствии со скоростью винта, момент сопротивления судна оказывается зависящим лишь от этой скорости. Однако, если мы рассмотрим случай реверсирования судна, то здесь имеют место иные явления. Несмотря на реверс винта, судно может продолжать двигаться в прежнем направлении. При этом гребной винт будет

испытывать момент сопротивления, зависящий от скорости судна, не пропорциональный в этот период скорости винта. Результирующий тормозной момент получает особую форму. Теоретическое ее нахождение исключительно сложно и пока никем не выполнено. Экспериментальные кривые, снятые в одном американском бассейне, приведены на фиг. 154. Поскольку здесь момент определяется скоростью судна, а стало быть и пройденным им путем, то статический момент в данном случае следует считать зависящим от пути механизма (судна) и скорости. В этот же класс



Фиг. 154. Кривые моментов сопротивления гребного винта при разных скоростях винта для разных скоростей судна.

Так как балансы имеют не совсем правильную форму, имеют сучки и вообще неоднородны, то нагрузка на дефибрере непрерывно меняется. В целях избежания острых пиков нагрузки подачи балансов управляет специальный регулятор, работающий в зависимости от тока главной цепи двигателя. Закономерность нагрузки на двигатель в зависимости от времени по существу выражена быть не может. Она является случайной функцией времени. По этим соображениям приходится вести расчет требуемого дефибрером статического момента по некоторой средней постоянной величине, установленной экспериментальными исследованиями.

Такой же характер процесса имеется в глиномялке, в камнедробилке, шаровой мельнице, внутри которой перекатываются шары, дробящие материал, резиновые вальцы, разминающие каучук, мездрильная машина, снимающая с кожи мездру, и т. п. Сюда же относится ряд следящих систем (влияние качки судна и т. п.)

Выше изложены кратко возможные закономерности статического момента различных исполнительных механизмов. Поскольку статическая мощность является произведением статического мо-

входит рулевое устройство судов, некоторые разводные пролеты мостов. Ряд механизмов перечислен в четвертом столбце табл. VIII.

У класс. К этому классу приходится практически относить все те исполнительные механизмы, в которых статический момент меняется в зависимости от времени, главным образом в силу свойств обрабатываемых материалов. Возьмем для примера дефибрер-механизм бумажной промышленности. Задача его заключается в превращении вращающимся непрерывно камнем древесных балансов в щепу, идущую дальше после размельчения на изготовление бумаги. Подача балансов, заключенных в специальную шахту, производится непрерывно цепями, прижимающими балансы к камню.

Таблица VIII
Классификация некоторых исполнительных механизмов по характеру статического момента

$M_m = \text{const}$	$M_m = f(v)$	$M_m = f(L)$	$M_m = f(\sigma, L)$	$M_m = f(t)$
<p>Мостовой кран:</p> <p>а) подъем</p> <p>б) тележка</p> <p>в) мост</p> <p>Лифт</p> <p>Тельфер</p> <p>Транспортные ленты</p> <p>Прокатные станы горячий и холодной прокатки:</p> <p>а) нереверсивные</p> <p>б) реверсивные</p> <p>Рольганг</p> <p>Наклинное устройство валков прокатных станов</p> <p>Шахтный подъемник с уравновешенным хвостовым началом</p> <p>Строгальный станок</p> <p>Ряд металлорежущих станков с вращательным движением</p> <p>Бумагоделательная машина</p> <p>Каландры разных отраслей промышленности</p> <p>Ситцепечатная машина</p> <p>Дубильный, жировальный, логные барабаны (кожевенная промышленность)</p>	<p>Вентилятор</p> <p>Дымосос</p> <p>Центробежный насос</p> <p>Центробежный компрессор</p> <p>Центрифуги</p> <p>Гребной винт</p> <p>Козловой кран</p> <p>Ластовальный и обкладочный каландр</p> <p>Поршневой компрессор (резиновая промышленность)</p> <p>Рогулечный и колесный ватеры (текстильная промышленность)</p>	<p>Механизмы с кривошипной передаточной</p> <p>Подъемный качающийся стол</p> <p>Кантователь</p> <p>Опродуватель</p> <p>Ножницы горячей резки</p> <p>Ставкиватель</p> <p>Вагоноопрокидыватель</p> <p>Поршневой насос</p> <p>Поршневой компрессор</p> <p>Шахтный подъемник с уравновешенным канатом</p> <p>Шахтный подъемник с перемещением радиусом навивки</p> <p>Качающийся конвейер</p> <p>Глубокий насос, эрлифт и газлифт (нефтяная промышленность)</p> <p>Балансирующий станок (нефтяная промышленность)</p> <p>Экскаватор</p> <p>Грейферные краны</p> <p>Деррик-кран</p> <p>Пневматические молоты</p> <p>Гидравлические машины</p> <p>Различные кривошипные прессы</p> <p>Различные ножницы</p> <p>Конечные машины</p>	<p>Электровоз</p> <p>Разводной пролет с крыльями</p> <p>Гребной винт</p> <p>Рулевое устройство</p>	<p>Дефрижер</p> <p>Шлифовальный станок</p> <p>Шаровая мельница</p> <p>Сахарная мельница</p> <p>Мездрильная машина (кожевенная промышленность)</p> <p>Пада для резки дерева</p> <p>Фрикционный момент</p> <p>Механизмы резки</p> <p>Новый промашленности:</p> <p>Бенбери</p> <p>Каландры</p> <p>Различные валцы</p> <p>Дорночный станок</p> <p>Механизмы прашательного бушелья</p> <p>Кардная машина</p> <p>Следящие системы</p>

мента на угловую скорость механизма ($P_m = M_m \cdot \omega_d$), то очевидно, что могут быть любые закономерности для изменения статической мощности. Законы их изменения будут рассмотрены далее.

47. Основные понятия об устойчивости электрифицированных агрегатов

При проектировании того или иного типа электропривода последний нужно выбирать таким образом, чтобы весь электрифицированный агрегат работал вполне устойчиво. Под устойчивостью машинного устройства необходимо понимать его свойство придти в состояние устойчивого равновесия в кратчайший промежуток после того, как оно было выведено из имевшего место ранее состояния равновесия или изменением нагрузки исполнительного механизма или другими причинами (изменением подведенного напряжения, тока возбуждения и т. д.). Условия устойчивости электрифицированного агрегата определяются совместно характеристиками и параметрами исполнительного механизма, двигателя и аппаратуры для его управления. Рассмотрение проблемы устойчивости электроприводов в полном объеме довольно сложно и выходит за пределы данного курса. В большинстве случаев детальное рассмотрение задачи сводится к решению линейных дифференциальных уравнений n -ного порядка (3, 4 и выше) с применением критерия устойчивости Гурвица или Найквиста. Эти последние дают условия, при которых отдельные экспоненциальные функции, входящие в выражение для общего интеграла рассматриваемого дифференциального уравнения, постепенно убывают до нуля. Тем самым процесс возвращается к устойчивому состоянию, определяемому начальными условиями имевшего место переходного процесса.

Здесь мы рассмотрим вопрос устойчивости электропривода в наиболее простой форме, применительно лишь к статическим характеристикам электродвигателей и исполнительных механизмов, не касаясь детально динамики и влияния на устойчивость работы такой аппаратуры, как, например, регуляторы [Л. 99].

Состояние равновесия электропривода определяется вообще равенством $\frac{d\omega}{dt} = 0$, т. е. $M_d = M_m$,

При изменении нагрузки исполнительного механизма M_m или при изменении момента двигателя M_d введением в его цепи сопротивления или каким-либо иным способом, это равновесие нарушается, и электропривод будет работать, подчиняясь основному уравнению движения привода (при положительном статическом моменте)

$$M_d - M_m = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Вращающий момент двигателя всегда является функцией скорости [$M_d = f(\omega)$]. Что же касается статического момента, то, как ясно из предыдущего, он может зависеть от разных факторов. Очевидно, что условия устойчивости электропривода в общем случае будут определяться характером изменения M_m . Мы здесь ограничимся рассмотрением лишь одного случая, когда статический момент зависит только от скорости $M_m = \varphi(\omega)$. При этом уравнение движения переписется в виде

$$f(\omega) - \varphi(\omega) = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Положим, что при отклонении электропривода от условий равновесия отдельные величины уравнения движения получают положительные или отрицательные приращения ΔM_d , ΔM_m , $\Delta\omega$, на которые изменяются ранее существовавшие M_{d1} , M_{m1} и ω_1 . В таком случае в новых условиях

$$M_d = M_{d1} + \Delta M_d; \quad M_m = M_{m1} + \Delta M_m; \quad \omega = \omega_1 + \Delta\omega.$$

Рассматривая очень малые промежутки времени, мы можем допустить, что M_d и M_m на этом участке изменяются прямолинейно. Тогда

$$\Delta M_d = \frac{dM_d}{d\omega} \cdot \Delta\omega; \quad \Delta M_m = \frac{dM_m}{d\omega} \cdot \Delta\omega.$$

Так как очевидно, что

$$\Delta M_d = \Delta M_m + J \cdot \frac{d(\Delta\omega)}{dt},$$

то

$$\left(\frac{dM_d}{d\omega} - \frac{dM_m}{d\omega} \right) \cdot \Delta\omega = -J \cdot \frac{d(\Delta\omega)}{dt}.$$

Интегрируя это равенство, получим

$$\Delta\omega = \Delta\omega_1 \cdot e^{-\frac{1}{J} \left(\frac{dM_m}{d\omega} - \frac{dM_d}{d\omega} \right) \cdot t},$$

где $\Delta\omega_1$ — первоначальное изменение угловой скорости при нарушении равновесия.

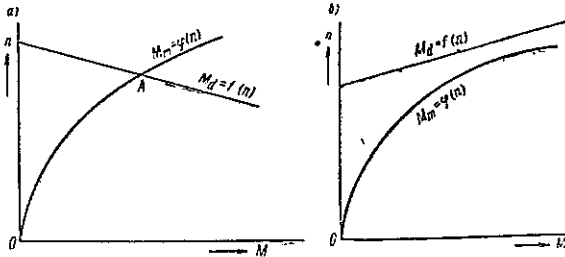
Так как J , очевидно, всегда величина положительная, то условия устойчивости электропривода, т. е. условия сведения $\Delta\omega$ к минимуму требуют, чтобы

$$\psi = \frac{dM_m}{d\omega} - \frac{dM_d}{d\omega} > 0.$$

При этом экспонента, характеризующая изменение $\Delta\omega$, будет постепенно затухать. Величина ψ может быть для данного случая названа коэффициентом устойчивости.

Рассмотрим сначала частный случай — работу электропривода холостую. При этом $\frac{dM_d}{d\omega} > 0$.

Отсюда следует, что механическая характеристика двигателя для устойчивости работы при холостом ходе всегда должна быть падающей, т. е. M_d с уменьшением скорости должен возрастать. Поэтому-то шунтовые двигатели постоянного тока с сильной реакцией якоря и компаундные двигатели с противоконпаундной обмоткой при холостом ходе и малых нагрузках обычно не могут работать устойчиво.



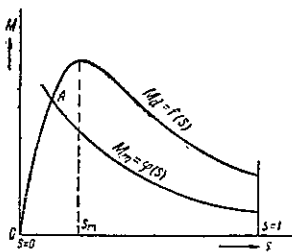
Фиг. 155 а, б. Характеристики двигателя и механизма в условиях устойчивой и неустойчивой работы.

механизма, повышающемся со скоростью, характеристика двигателя должна носить падающий характер. На фиг. 155а представлены характеристики двигателя и механизма, соответствующие устойчивой работе, а на фиг. 155б показаны условия неустойчивой работы.

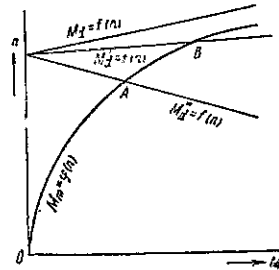
При $M_m \neq 0$

$$\frac{dM_m}{d\omega} > \frac{dM_d}{d\omega}$$

Отсюда вытекает, что при $M_m = const$ и при положительном статическом моменте



Фиг. 156. Неустойчивая работа асинхронного двигателя от $s=1$ до $s=s_m$.



Фиг. 157. Устойчивая работа двигателя при вентиляторной характеристике.

Фиг. 156 иллюстрирует, почему в большинстве случаев характеристика короткозамкнутого асинхронного двигателя от $s=1$ до $s=s_m$ является неустойчивой.

На фиг. 157 для одной вентиляторной характеристики механизма и трех механических характеристик шунтового двигателя показаны точки установившегося равновесия А и В. Наиболее подходящей для работы характеристикой является кривая $M_d^m = f(n)$.

Повышающаяся кривая $M'_d = f(n)$ устойчивой работы обеспечить не может.

Рассмотренные выше условия относятся к пусковому режиму и режиму изменения нагрузки электропривода при положительном статическом моменте. В общем случае условие статической устойчивости приобретает вид

$$\left(\mp \frac{dM_d}{d\omega} \mp \frac{dM_m}{d\omega} \right) \cdot \Delta\omega = J \cdot \frac{d(\Delta\omega)}{dt}.$$

, Обобщенные условия равновесия будут

$$\left(\mp \frac{dM_m}{d\omega} + \frac{dM_d}{d\omega} \right) > 0.$$

В приведенном равенстве знаки зависят от режима работы и характера статического момента (§ 20).

В случае торможения при положительном статическом моменте

$$\psi = \frac{dM_m}{d\omega} + \frac{dM_d}{d\omega} > 0.$$

В случае торможения при отрицательном статическом моменте

$$\psi = \frac{dM_d}{d\omega} - \frac{dM_m}{d\omega} > 0.$$

Таким образом условия устойчивости определяются относительными углами наклона характеристик двигателя и механизма к оси абсцисс

$$\frac{dM_d}{d\omega} = \operatorname{tg} \alpha_d; \quad \frac{dM_m}{d\omega} = \operatorname{tg} \alpha_m.$$

В зависимости от условий и режима работы

$$\operatorname{tg} \alpha_d \geq \operatorname{tg} \alpha_m.$$

Считаем необходимым отметить, что приведенные выше условия устойчивости вообще являются обязательными для всех электроприводов. Однако в ряде случаев, как видно будет из последующего, они оказываются еще недостаточными, так как динамические характеристики двигателей вследствие влияния самонадукции не соответствуют статическим. Наиболее сложные условия получаются при воздействии на двигатель автоматического регулятора. Некоторые более сложные случаи будут освещены частично несколько подробнее далее.

48. Обобщенная классификация нагрузочных диаграмм и переходных режимов

Задача данного раздела заключается прежде всего в том, чтобы научить способам нахождения нагрузочных диаграмм и решению задач переходных режимов для самых разнообразных условий, т. е. принципиально для всех многочисленных механизмов самых разнообразных отраслей промышленности.

Так как все возможные варианты рассмотреть здесь невозможно, да и не нужно, мы постараемся дать это рассмотрение в систематизированной форме с тем, чтобы выявить основную методику решения задачи для наиболее типичных случаев.

Заметим, что было бы в этом отношении не совсем целесообразно рассматривать переходные режимы только в порядке деления: а) пусковых условий; б) рабочих условий; в) тормозных условий. Как видно будет из последующего, в ряде случаев характер пусковых процессов протекает так же, как и рабочих. Тормозные процессы протекают в ряде случаев аналогично пусковым. Поэтому в основу классификации мы должны положить другие принципы. Мы будем по возможности стремиться рассматривать общие условия переходных режимов того или другого электропривода, получая из них условия пуска, торможения и работы иногда как частности. Материал излагается таким образом, чтобы избежать неоднократного повторения одних и тех же математических выкладок и физических интерпретаций. Получаемые при этом общие положения иллюстрируются рядом примеров, по которым даются окончательные выводы о выборе мощности электропривода, а иногда и о необходимой комбинации его механических характеристик. Вопросы управления электроприводом рассматриваются лишь вскользь, так как изучение их производится в особом курсе "Управление электроприводами".

Прежде чем переходить к классификации, сделаем еще несколько предварительных замечаний. Теоретическое рассмотрение переходных режимов электропривода с учетом всех влияющих на них факторов во многих случаях представляет исключительные трудности. Часто мы приходим к таким нелинейным дифференциальным уравнениям, которые не поддаются аналитическому решению. Вместе с тем законы изменения отдельных параметров электродвигателей до сих пор не изучены. Так, например, не установлены достаточно точно для всех случаев математические законы изменения коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции электрических машин в зависимости от тока и насыщения. Эти обстоятельства делают во многих случаях неизбежным пользование теми или иными опытными кривыми или коэффициентами и методами приближенного графического интегрирования.

Неизученные вопросы имеются не только в электродвигателях и аппаратуре, но также и в самих исполнительных механизмах.

Так до сих пор исчерпывающе не исследованы изменения потерь в передачах, несмотря на то, что они влияют на переходные режимы как в отношении длительности процессов пуска и торможения, так и в отношении толчков тока.

На переходные процессы, а стало быть и на нагрузочные диаграммы оказывают влияние различные виды инерции: 1) инерция механическая от вращающихся частей двигателей, исполнительных механизмов и промежуточных передач и механическая инерция управляющих аппаратов; 2) инерция электромагнитная от самоиндукции и взаимной индукции обмоток электродвигателей и электромагнитной аппаратуры; 3) инерция тепловая всех частей двигателя, преимущественно медных обмоток и некоторых элементов аппаратуры, преимущественно проводящих. Каждый вид инерции задерживает в той или иной мере протекание переходного процесса и влияет на его характер.

Влияние того или иного вида инерции характеризуется соответствующими инерционными постоянными времени:

1. Механическая инерция — так называемой электромеханической постоянной времени B . Величина ее зависит от типа двигателя, маховых масс всей системы и характера статического момента рабочей машины. В силу зависимости этой постоянной также от некоторых электрических свойств двигателя она и называется электромеханической. Соответствующие зависимости для нее будут даны дальше. В аппаратуре электромеханические постоянные определяются кинематикой движущихся звеньев.

2. Электромагнитная инерция характеризуется так называемой электромагнитной постоянной времени, различной для каждой обмотки (безразлично для двигателя или аппаратуры) и равной $T = \frac{L}{R}$, где L — коэффициент самоиндукции обмотки, а R — активное сопротивление.

3. Тепловая инерция характеризуется так называемой постоянной времени нагрева θ , представляющей, как известно, отношение теплоемкости рассматриваемой части к ее теплоотдаче A

$$\theta = \frac{C}{A}.$$

Каждая обмотка двигателя, каждый проводящий элемент аппаратуры имеют свою постоянную времени нагрева. Последние влияют на поведение машины, поскольку нагревание обмотки сказывается на ее сопротивлении в соответствии с законом изменения сопротивления:

$$R_{\theta_1} = R_{\theta_2} [1 + \alpha (\theta_1 - \theta_2)],$$

где α — температурный коэффициент сопротивления материала обмотки, а θ_1 и θ_2 — начальная и конечная температура обмотки за рассматриваемый период. Отсюда ясно непосредственное влия-

ние тепловой инерции на величину электромагнитных постоянных. Как видно будет из дальнейшего, нагревание отзывается и на величине B , так как в нее также входит сопротивление цепи R . Однако механические и электрические процессы протекают весьма быстро, а потому изменение температуры для двигателей за это время невелико. Поэтому при рассмотрении переходных режимов мы учетом влияния температуры ввиду сложности, а также часто ввиду малого практического значения пренебрегаем, хотя иногда мы пускаем холодный двигатель с холодной аппаратурой, а иногда «горячий» с «горячей» аппаратурой.

Современный учет переходных режимов электропривода практически ограничивается обычно лишь механической и электромеханической инерцией. Для ряда случаев, где не требуется очень большая точность и где это возможно по сути дела, мы ограничиваемся учетом влияния лишь одной механической инерции. По существу теория привода до последнего времени и рассматривала электропривод в подобных условиях. Для большей четкости, а также и для краткости в дальнейшем, те переходные режимы, в которых учитывается лишь механическая инерция электропривода и рабочей машины, мы назовем условно механическими переходными режимами. Эти режимы по существу определяются одним уравнением движения электропривода Д'Аламбера.

Те же переходные режимы, в которых кроме механической инерции учитывается также и электромагнитная, будем условно называть электромеханическими переходными режимами. При анализе этих последних приходится иметь дело кроме уравнения Д'Аламбера с дифференциальным (одним или несколькими) уравнением равновесия э. д. с. и падений напряжения в электрических цепях. Необходимость изучения последней категории переходных режимов проистекает из стремления более точно определять длительности пусковых и тормозных процессов, из стремления достигнуть наилучшего использования двигателей и из стремления получить наиболее совершенные способы управления двигателем. В этом случае приходится совместно решать несколько дифференциальных уравнений.

В соответствии с указанным мы делим все переходные режимы и нагрузочные диаграммы на пять областей: A, B, C, D, E .

Область A является простейшей. К ней относятся такие нагрузочные диаграммы и электроприводы таких исполнительных механизмов, для которых переходные режимы пуска, торможения, изменения нагрузки практического значения не имеют. Нагрузочная диаграмма момента или мощности этой области имеет в пренебрежении пуском и торможением вид фиг. 158. Как момент статический, так и момент двигателя остаются во время работы постоянными:

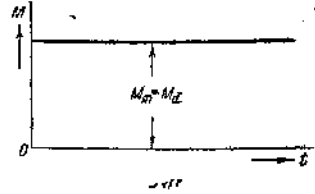
$$M_d = M_m = \text{const}; \quad J \frac{d\omega}{dt} = 0.$$

Привод работает с постоянной скоростью. Никакого решения уравнений движения привода здесь не требуется.

Эквивалентный момент двигателя

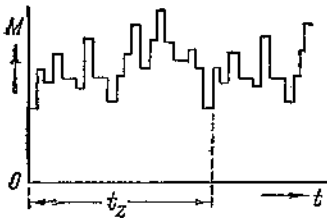
$$M_g = \sqrt{\frac{\int_0^{t_1} M_m^2 dt}{t_1}} = M_m.$$

Иногда к этой области мы искусственно (но практически это допустимо) относим и другие нагрузочные диаграммы с малыми колебаниями скорости и неизвестным нам случайным колебанием статического момента, например, дефибреры, шаровые мельницы, глиномялки. Как уже отмечалось, вид функции $M_m = f(t)$ в этих случаях нам неизвестен. Эксперимент дает нам диаграмму лишь одного частного случая. Мы упрощенно допускаем, что $M_m = \text{const}$ и тем самым нагрузочные диаграммы электроприводов с этими и аналогичными механизмами относим к области А. Строго теоретически они относятся к следующим областям. Очевидно, что к области А могут быть отнесены нагрузочные диаграммы механизмов лишь с постоянным маховым моментом, с постоянным передаточным числом, с постоянным к. п. д. передач. В противном случае $M_m \neq M_d$ и $J \cdot \frac{d\omega}{dt} \neq 0$.



Фиг. 158. Нагрузочная диаграмма области А.

Иногда к этой простейшей области мы относим на практике сравнительно сложные случаи. Так, при приводе непрерывного прокатного стана с несколькими непрерывными клетями, приводимыми одним синхронным двигателем, мы при учете мощности двигателя обычно пренебрегаем переходными режимами в двигателе вследствие их кратковременности. Учет переходных режимов двигателя при выборе мощности двигателя в данном случае оказывается ненужным. Мы полагаем, что $M_d = M_m$. Одна из таких нагрузочных диаграмм заготовочного прокатного стана представлена на фиг. 159.



Фиг. 159. Нагрузочная диаграмма заготовочного непрерывно-го прокатного стана.

Ступенчатость диаграммы обусловлена введением металла в валки и выходом из них. Пренебрегая явлениями переходных режимов и полагая $n = \text{const}$, получаем $M_d = M_m$ и следовательно,

$$M_g = \sqrt{\frac{\sum_0^{t_1} M_m^2 \Delta t_z}{t_1}}.$$

К области A мы можем при определении мощности двигателя отнести нагрузочные диаграммы многодвигательного привода бумагоделательной машины постоянного тока. Здесь для поддержания постоянства скорости двигателей при меняющейся нагрузке приходится применять специальные регуляторы скорости.

Не учитывая особенностей переходных режимов при выборе мощности двигателя, мы можем положить, что во время работы (пуск исключаем) $M_d = M_m = \text{const}$.

Учет переходных режимов здесь необходим лишь для выяснения вопроса о возможности достижения в выбранной схеме нужной производительности (отсутствие разрыва бумаги) и нужного качества (минимальные колебания скорости двигателя). Рассмотрение работы такого привода с регулятором относится к следующим областям.

С теоретической и практической точки зрения в современной практике электропривода имеют наибольшее значение области B и C . Они и представляют основу современной теории электропривода.

Практически в электроприводе мы весьма часто сталкиваемся с непрерывным изменением скорости двигателя из-за отсутствия равновесия между M_d и M_m или непрерывного его нарушения. Работа электропривода протекает в соответствии с уравнением Д'Аламбера почти в непрерывных ускорениях и замедлениях. В области B нами учитывается лишь влияние механической инерции системы.

Следовательно, область B — это область механических переходных режимов.

Область C учитывает кроме механической инерции системы электромагнитную инерцию обмоток двигателя. В ней поведение двигателя характеризуется кроме уравнения механического равновесия системы одним или несколькими уравнениями электрического равновесия цепей обмоток двигателя. Область механико-электрических переходных режимов полностью еще не изучена, и решение отдельных задач из этой области составляет еще предмет многих проводящихся у нас в настоящее время научно-исследовательских работ.

Область D охватывает совместное рассмотрение работы электродвигателя исполнительного механизма и управляющей аппаратуры с учетом их механической и электромагнитной инерции. В ней к уравнениям области B добавляются уравнения механического и электрического равновесия для аппаратов управления. Эта область изучена лишь в частности.

Область E , усложняющаяся по сравнению с областью D за счет учета тепловой инерции машин и аппаратов по существу до сих пор не изучалась. В пределах требующейся практикой электропривода точности изменением температуры обмоток в переходных режимах мы до сих пор по существу могли пренебрегать. Для обычной практики вряд ли потребуются изучение этой области в ближайшее время вообще.

Таким образом в настоящем курсе мы сосредоточим все внимание прежде всего на области B — механических переходных режимов. Области C мы коснемся в тех случаях, где это совершенно необходимо для практических выводов и где это важно в смысле решения ближайших конкретных задач. Из области D мы по характеру и объему курса коснемся кратко лишь одного частного примера из области регулирования, чтобы показать общее направление и методику решения задач. Области E мы совершенно рассматривать не будем.

Итак задача рассмотрения переходных режимов заключается в решении той или иной комбинации дифференциальных уравнений: механического равновесия системы и электрического равновесия в цепях двигателя. Рассмотрим сначала подробную классификацию области B .

Из предыдущего видно, что уравнение движения привода состоит из трех членов: момента двигателя M_d — движущего или тормозящего, приведенного статического момента M_m — положительного или отрицательного, динамического момента M_j — положительного или отрицательного. Естественно, что методика решения уравнения зависит от вида отдельных его составляющих.

Таким образом основанием классификации должны служить прежде всего различные выражения составляющих уравнений движения привода M_d , M_m и M_j . Поскольку электропривод предназначен для приведения в движение исполнительных механизмов, то свойства этих машин должны прежде всего служить одним из основных факторов классификации. В соответствии с характером изменения статического момента, изложенным выше, переходные режимы и разделены по классам. Заметим, что деление нагрузочных диаграмм по основным температурным режимам работы (длительный, кратковременный, повторно-кратковременный) с точки зрения решения уравнений движения привода нехарактерно.

Вторым решающим фактором в отношении поведения электропривода является характер изменения момента двигателя от скорости. Как уже разобрано выше, механические характеристики двигателя $[M_d=f(n)]$ весьма разнообразны.

Сочетание разных характеристик двигателя с одним и тем же характером статического момента рабочей машины придает дифференциальному уравнению движения привода и его решению тот или иной вид. Стало быть характер изменения моментов вращения разных типов двигателей должен быть также базой для классификации нагрузочных диаграмм.

Согласно свойствам механической характеристики двигателей разделение переходных режимов сделано далее по категориям. Нужно отметить, что в этом отношении решающим является не то, как называется двигатель и работает ли он на постоянном или переменном токе. Все определяется формой и аналитическим выражением механической характеристики. Так, асинхронный двигатель с кольцами и шунтовой двигатель постоянного тока при

Обобщенная классификация нагрузочных

Область	A	B			
Характеристика области	Нагрузочные диаграммы строго постоянной скорости	Нагрузочные диаграммы с ускорением и замедлением электропривода (включая пуск и торможение)			
Основной вид уравнений области	$M_d = M_m$	$\pm M_d \mp M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} (x)$ <p style="text-align: center;">или</p> $\pm M_d \mp M_m = J_{(x)} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ_{(x)}}{dx} \cdot \frac{\omega^2}{2} (y)$			
Подразделение областей	Группа α	Группа α (уравнение x)	Группа β (уравнение x или y)		
Подразделение нагрузочных диаграмм по классам и категориям в соответствии с характером изменения M_d и M_m	Нет	При постоянных значениях: GD^2, k, η_p		При переменных значениях GD^2, k, η_p	
		Классы	Характеристика класса		
		I	$M_m = \text{const}$		
		Категории	Тип привода		
			1		Шунтовая характерист.
			2		Серпесная "
			3		Компаундная "
4	Асинхронная "				
5	Синхронная "				
II	$M_m = f(v)$ Категории те же, что и в I кл.				
III	$M_m = f(L)$ Категории те же, что и в I кл.				
IV	$M_m = f(v, L)$ Категории те же, что и в I кл.				
V	$M_m = f(f)$ Категории те же, что и в I кл.				

¹ Разработанная нами классификация дается здесь в несколько упрощенном виде.

диаграмм электропривода¹

Таблица IX

C		D		E	
Нагрузочные диаграммы переходных режимов электропривода (с учетом электромагнитной инерции двигателя)		Нагрузочные диаграммы переходных режимов электропривода с учетом механической и электромагнитной инерции аппаратуры		Нагрузочные диаграммы переходных режимов электропривода с учетом условий работы аппаратуры и тепловой инерции двигателя и аппаратуры	
Система уравнений состоит из: 1) уравнения движения x или y (см. область B) 2) одного или нескольких уравнений электрических цепей в зависимости от типа двигателя		Система уравнений состоит из: 1) уравнения движения привода 2) одного или нескольких уравнений электрических цепей двигателя 3) одного или нескольких уравнений для элементов аппаратуры		Те же уравнения, что и в D , с дополнительными уравнениями теплового равновесия для двигателей и элементов аппаратуры	
Группа α	Группа β	Группа α	Группа β	Группа α	Группа β
При постоянных значениях GD^2, k, η_p	При переменных значениях GD^2, k, η_p	При постоянных значениях GD^2, k, τ_p	При переменных значениях GD^2, k, τ_p	При постоянных значениях GD^2, k, τ_p	При переменных значениях GD^2, k, τ_p
То же, что и в $B-\alpha$	То же, что и в $C-\alpha$	То же, что и в $B-\alpha$ с дополнительным подразделением в зависимости от элементов автоматической аппаратуры (.)	То же, что и в $D-\alpha$	То же, что и в $D-\alpha$	То же, что и в $D-\alpha$

некоторых условиях для многих случаев могут быть отнесены к одной категории.

Нужно еще раз подчеркнуть, что наименование режима (пуск, торможение, работа) не может быть базой для классификаций. Как будет дальше видно, методика решения уравнений для пуска часто будет совпадать с методикой решения для рабочих условий. Решения уравнений для условий пуска и торможения во многих случаях будут совпадать.

Следующим основным элементом, на котором могла бы базироваться классификация, должен был бы являться 3-й член уравнения движений привода — динамический момент M_j .

Однако угловое ускорение не может уже служить базой для классификации, так как характер кривой (M_j) определяется разностью M_d и M_m , которые нами уже учтены. Правда, иногда говорят о переходных режимах, в которых скорость меняется по закону прямой линии, по параболическому закону, по экспоненциальному и т. п. Однако подобное подразделение диаграмм может быть использовано лишь для классификации вторичного порядка. Идя от заданного закона изменения M_j , мы могли бы притти лишь к необходимым законам изменения разности ($M_d - M_m$), т. е. практически к необходимому характеру изменения M_d , что для общей классификации имеет меньшее значение. Впрочем, этот способ может быть применен к определенным электроприводам, например, при работе по шаблону.

Изложенное выше определяет основную структуру классификации и относится по существу ко всем областям B , C , D и E . Однако необходимо еще дополнительное подразделение каждой из этих областей. В табл. IX оно дано по вертикали.

В случае переменного махового момента уравнение движения привода усложняется. Усложнение имеет место и при переменном передаточном числе и при переменном к. п. д. передач. Поэтому каждая область с одними и теми же классами и категориями должна быть разделена по крайней мере на две группы:

- а) группа с постоянными значениями J , k_x и η ;
- б) группа с переменными значениями J , k_x и η .

Вторая группа имеет несколько более узкое практическое значение, чем первая. Случаи переменного J относятся преимущественно к кривошипным механизмам. Переменное значение расчетного J практически имеет место во всех случаях (п. 24) за счет изменения η . Однако для упрощения мы обычно изменением η пренебрегаем и принимаем для расчета его постоянным. Наиболее характерным примером переменного передаточного числа является привод через гидравлическую муфту, хотя бы типа Дженни.

В пределах данного учебника в основном мы будем разбирать лишь группу а, в которую и входит большинство производимых в настоящее время расчетов. Группа б будет затронута лишь частично.

В целях методических, а также по соображениям экономии во времени оказывается более целесообразным изучение переходных режимов вести не по классам исполнительных механизмов, а по категориям механических характеристик двигателей. Поэтому дальнейшее рассмотрение переходных режимов областью *B* и *C* мы будем вести следующим образом.

Сначала рассмотрим механические режимы (область *B*) первой категории с шунтовой характеристикой для различных классов исполнительных механизмов. За ним последует рассмотрение электромеханических режимов (область *C*) для той же категории. За первой категорией в аналогичном порядке будет рассмотрена вторая, третья и т. д.

Некоторые возможные принципиально сочетания отдельных категорий характеристик с отдельными классами исполнительных механизмов, не имеющие практического значения или имеющие малое практическое значение, будут упущены. В рассмотрение введены лишь наиболее типичные случаи с иллюстрацией их характерными практическими примерами. По условиям объема курса некоторые сложные случаи, с которыми приходится иметь дело весьма ограниченному кругу лиц (преимущественно переходные режимы синхронных двигателей), также не включены в курс. По условиям экономии объема несколько случаев (система Леонарда, работа двигателя постоянного тока с регулятором) перенесены в последующие главы курса.

49. Механические переходные режимы электропривода с шунтовой характеристикой при постоянном статическом моменте

Рассмотрим решение уравнений движения электропривода с шунтовой характеристикой в общем виде для случая $M_m = \text{const}$ с тем, чтобы в дальнейшем применить его уже для ряда различных режимов. Это рассмотрение в основном относится к шунтовому двигателю постоянного тока, однако все изложенное ниже может быть полностью применено к асинхронному двигателю с кольцами в тех пределах, в каких можно полагать его момент пропорциональным скольжению (п. 39).

Сначала разберем двигательный режим. При этом для упрощения выкладок мы будем оперировать с переменной *s* (скольжением), а не с переменной *n* (скоростью вращения).

Исходное уравнение движения привода имеет вид

$$M_d - M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (84)$$

Так как $n = n_0 \cdot (1 - s)$, то

$$\frac{dn}{dt} = -n_0 \frac{ds}{dt}$$

откуда

$$M_d - M_m = -\frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt} \quad (258)$$

Выразим постоянные значения M_d и M_m в функции s , пользуясь уравнением вращающего момента шунтовой машины

$$M_d = c \cdot s_d \quad (154)$$

Из него следует, что

$$\frac{M_d}{s_d} = \frac{M_N}{s_N} = \frac{M_m}{s_s} \quad (154')$$

где s_s — постоянный коэффициент, равный тому скольжению, которое двигатель имел бы при моменте $M_d = M_m$. В ряде случаев двигатель момента M_m не достигает.

Подставляя из (154) значения M_d и M_m , выраженные через M_N и s_N в (258), получаем

$$\frac{M_N}{s_N} \cdot s_d - \frac{M_N}{s_N} \cdot s_s = -\frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt}$$

Этот вид уравнения пригоден как для случая пуска двигателя, так и для случая ускорения и замедления при изменении нагрузки. Разделяя переменные, имеем

$$\frac{ds}{s_d - s_s} = -\frac{375 \cdot M_N}{GD^2 \cdot n_0 \cdot s_N} \cdot dt = -\frac{1}{B} \cdot dt \quad (259)$$

где B , — как видно, величина постоянная и равная

$$B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_N \quad (260)$$

После интегрирования (259) получаем

$$\ln(s_d - s_s) - \ln k = -\frac{1}{B} t,$$

где $\ln k$ — подинтегральная постоянная.

Таким образом

$$s_d - s_s = k \cdot e^{-\frac{t}{B}} \quad (261)$$

В начале работы, т. е. при $t=0$, $s_d = s_N$ (начальное исходное скольжение).

Следовательно,

$$k = s_N - s_s$$

Окончательный вид уравнения для s_d

$$s_d = s_s \left(1 - e^{-\frac{t}{B}}\right) + s_N \cdot e^{-\frac{t}{B}} \quad (262)$$

Заменяя скольжение через пропорциональные им моменты, имеем

$$M_d = M_m \left(1 - e^{-\frac{t}{B}} \right) + M_n \cdot e^{-\frac{t}{B}}, \quad (263)$$

где M_n — начальный вращающий момент для переходного режима.

Таким образом как скольжение (соответственно и скорость), так и момент шунтового двигателя при $M_m = \text{const}$, изменяются по экспоненциальному закону.

Величина B называется постоянной времени механической инерции электропривода или короче электромеханической постоянной электропривода. Выражается она в секундах и имеет вполне определенный физический смысл. Как следует из равенства (260), численно она равна времени пуска электропривода при $M_j = \text{const} = M_N$, умноженному на номинальное скольжение s_N .

Электромеханическая постоянная представляет также то время, в течение которого маховые массы электропривода, разряжаясь равномерно от запаса своей живой силы, соответствующей изменению скорости от n_0 до n_N , смогли бы отдавать непрерывно мощность, равную номинальной мощности двигателя. Это легко подтверждается следующим выводом:

$$\begin{aligned} B &= \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_N = \frac{GD^2}{4g \cdot \frac{60}{2\pi}} \cdot \frac{s_N \cdot n_0 \omega_N}{P_N} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{\omega_0 \cdot \omega_N \frac{\omega_0 - \omega_N}{\omega_0}}{P_N} \approx \\ &\approx \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{\omega_0^2 - \omega_N^2}{2} \cdot \frac{1}{P_N}. \end{aligned} \quad (264)$$

Заменяя в (264) ω_N через $\frac{\omega_0 + \omega_N}{2}$, мы делаем небольшую ошибку.

Так при $\omega_N = 0,97 \omega_0$, т. е. при $s_N = 3\%$,

$$\frac{1}{2} (\omega_0 + \omega_N) = 0,985 \omega_0.$$

Постоянная B в электроприводе играет огромную роль, так как характеризует быстроту установления механических процессов.

Из уравнений (262) или (263) видно, что электропривод достигает установившегося состояния движения после бесконечно долгого времени, так как $M_d = M_m$ лишь при $t = \infty$. Однако по истечении $t = 5B$ максимум кривой отстоит от ее асимптоты

всего лишь на 0,5% M_m . В самом деле, при начальном моменте $M_N=0$ можем написать

$$M_d = M_m \left(1 - e^{-\frac{t}{B}} \right) = M_m \left(1 - \frac{\gamma}{100} \right).$$

Значениям . . . $\frac{t}{B} = 2,3 \quad 3 \quad 3,22 \quad 3,51 \quad 3,91 \quad 4,6 \quad 5,3$

соответствуют

значения $\gamma = 10 \quad 5 \quad 4 \quad 3 \quad 2 \quad 1 \quad 0,5$.

При $t \approx 4B$ мы получаем отклонение M_d от максимума M_m всего в 2% (см. аналогичные условия в тепловых режимах п. 6).

Таким образом мы можем считать, что неустановившийся процесс продолжается практически период времени длительностью $(4 \div 5)B$, когда он переходит в установившийся.

Постоянная B имеет вид равенства (260) лишь для шунтовых двигателей постоянного тока и асинхронных с кольцами, для последних в пределах поставленных выше условий. Для других типов двигателей она имеет более сложный вид, о чем будет сказано далее. Для шунтовых машин постоянного тока выражению для B можно придать также несколько иной вид. Учитывая, что $M_N = k_1 \cdot I_N$ и заменяя в (260) s_N через числа оборотов в минуту, получим

$$B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_N = \frac{GD^2 \cdot n_0 \cdot \frac{n_0 - n_N}{n_0}}{375 k_1 I_N}.$$

Так как далее

$$I_N = \frac{U - E_N}{R}, \quad \text{а} \quad U = k_3 \cdot n_0, \quad E_N = k_2 \cdot n_N,$$

то

$$B = \frac{GD^2 \cdot R}{375 \cdot k_1 \cdot k_2}. \quad (265)$$

Как выражение (260), так и (265) показывают, что электромеханическая постоянная остается неизменной лишь для определенного сопротивления главной цепи R , дающего скольжение s_N .

При другом сопротивлении в главной цепи R_x скольжение при номинальном токе s_{Nx} меняется, ибо

$$s_{Nx} = \frac{n_0 - n_{Nx}}{n_0} = \frac{U - E_{Nx}}{U} = \frac{I_N R_x}{U}.$$

Меняется пропорционально s_N или R и величина B . Однако она попрежнему будет характеризовать длительность процесса.

50. Решение уравнения движения электропривода с шунтовой характеристикой в относительных единицах

Решение уравнения (258) в относительных единицах у нас впервые было применено инж. Л. Б. Гейлером [Л. 93].

Деля (258) на M_N , получим

$$\frac{M_d}{M_N} - \frac{M_m}{M_N} = \frac{M_j}{M_N} = -n_0 \cdot \frac{GD^2}{375 \cdot M_N} \cdot \frac{ds}{dt} \cdot \frac{s_N}{s_N},$$

Обозначая $\frac{M_d}{M_N} = \mu_d$, а $\frac{M_m}{M_N} = \mu_m$, имеем

$$\mu_d - \mu_m = \mu_j = -B \cdot \frac{d\left(\frac{s}{s_N}\right)}{dt} = -\frac{d\left(\frac{s}{s_N}\right)}{d\left(\frac{t}{B}\right)} = -\frac{d\sigma}{d\tau}, \quad (266)$$

где σ — скольжение в относительных единицах, причем масштабом служит номинальное скольжение, а τ — время в относительных единицах, причем масштабом для времени служит электромеханическая постоянная B .

Равенство (266) дает

$$d\tau = -\frac{d\sigma}{\mu_d - \mu_m}. \quad (267)$$

Так как $M_d = c \cdot s_d$, где $c = \frac{M_N}{s_N}$, то

$$\mu_d = \frac{M_d}{M_N} = \frac{c \cdot s_d}{M_N} \cdot \frac{s_N}{s_N} = \frac{s_d}{s_N} = \sigma_d.$$

Соответственно $\mu_m = \sigma_m$.

Подставляя в (267), имеем

$$d\tau = -\frac{d\sigma}{\sigma_d - \sigma_m}.$$

Интегрируя аналогично (259), находим

$$\sigma_d = \sigma_m (1 - e^{-\tau}) + \sigma_n e^{-\tau} \quad (262')$$

или

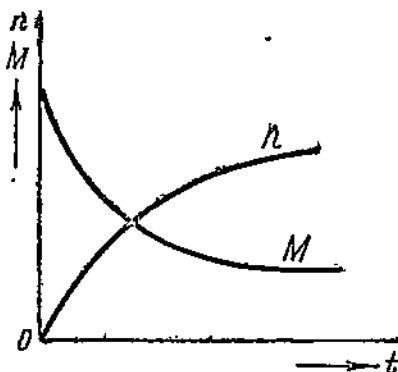
$$\mu_d = \mu_m (1 - e^{-\tau}) + \mu_n e^{-\tau}, \quad (263')$$

где σ_n и μ_n — соответственно начальные относительные скольжение и момент,

Уравнение в относительных единицах применимо к любому шунтовому двигателю постоянного тока и к асинхронному с кольцами (в указанных выше пределах).

51. Приложение полученных решений к пусковому режиму электропривода с двигателем с шунтовой характеристиккой

В начале для упрощения рассмотрим пуск шунтового двигателя при неизменном сопротивлении в цепи якоря, соответствующего какой-то одной ступени пускового реостата. Изменение момента и скорости двигателя происходит в этом случае по экспоненциальному закону, определяемому равенствами (262) и (263). Изменение момента двигателя и скорости графически представлено на фиг. 160. Как выяснено в предыдущем, время пуска, т. е. разгон от покоя до установившейся скорости при неизменном сопротивлении,



Фиг. 160. Изменение момента шунтового двигателя в случае пуска при $M_m = \text{const}$ и при $R = \text{const}$.

$$t_p \approx 5B_x = 5 \cdot \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_{Nx}$$

где s_{Nx} — скольжение, соответствующее при данном сопротивлении номинальному току якоря двигателя I_N .

Величина

$$s_{Nx} = \frac{U - E_{Nx}}{U} = \frac{I_N \cdot R_x}{U}$$

При пуске двигателя через несколько ступеней пускового сопротивления уравнение движения остается тем же, но только при переходе на каждую следующую ступень, на каждую новую характеристику меняется номинальное скольжение s_{Nx} и вместе с ним меняется электромеханическая постоянная

$$B_x = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_{Nx} = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot \frac{I_N \cdot R_x}{U} = \frac{GD^2 \cdot R_x}{375 k_1 k_2}$$

Время работы двигателя на каждой ступени может быть вычислено по величине предельного минимального тока I_{\min} , стало быть, и предельного момента $M_{\min} = k_1 I_y$, которого должен достичь двигатель на этой ступени.

При заданном M_{\min} и M_N

$$M_{\min} = M_m \left(1 - e^{-\frac{t_x}{B_x}}\right) + M_n \cdot e^{-\frac{t_x}{B_x}} = M_m + (M_n - M_m) e^{-\frac{t_x}{B_x}}$$

Так как

$$e^{-\frac{t_x}{B_x}} = \frac{M_n - M_m}{M_{\min} - M_m},$$

то

$$t_x = B_x \ln \frac{M_n - M_m}{M_{\min} - M_m}$$

или в относительных единицах

$$\tau_x = \ln \frac{\mu_n - \mu_m}{\mu_{\min} - \mu_m}.$$

Соответственно в процентах

$$\tau_x \% = 100 \cdot \ln \frac{\mu_n \% - \mu_m \%}{\mu_{\min} \% - \mu_m \%}.$$

Время пуска при неизменном сопротивлении можно выразить также и через скольжение, принимая его пропорциональным моменту двигателя

$$t_p = B_x \ln \frac{s_n - s_s}{s_{\min} - s_s} = B_x \ln \frac{1 - s_s}{s_{\min} - s_s}. \quad (267)$$

Если конечное скольжение s_{\min} принять равным s_s , то формула даст для t_p величину, равную бесконечности. Поэтому практически приходится принимать $s_{\min} \approx 1,05s_s$, т. е. $M_{\min} = 1,05M_n$.

Тогда получим:

$$t_p = B_x \ln \frac{1 - s_s}{0,05 s_s}.$$

Вычисляя время работы на каждой ступени, можно получить и полное время пуска двигателя.

Обычно при расчете пусковых сопротивлений толчки тока и минимумы тока (или момента) принимаются одинаковыми для всех ступеней. В таком случае при переходе с первой ступени на вторую можно написать

$$I_{\min} = \frac{U - E_1}{R_1}; \quad I_{\max} = \frac{U - E_1}{R_2},$$

так как за время переключения поток двигателя и обратная э. д. с. остаются постоянными. В таком случае

$$\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Аналогично для всех ступеней можно написать

$$\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{R_2}{R_3} = \frac{R_3}{R_4} = \dots = \frac{R_{k-1}}{R_k} = \text{const} = \delta.$$

Итак в шунтовой машине сопротивления пусковых ступеней изменяются в геометрической прогрессии

$$R_k = R_1 \cdot \delta^{-k+1},$$

Это равенство и может быть использовано для аналитического расчета пусковых реостатов.

При неизменных значениях для каждой ступени максимума и минимума вращающих моментов двигателя, равных M_{\max} и M_{\min}

$$t_x = B_x \cdot \ln \frac{M_{\max} - M_m}{M_{\min} - M_m}.$$

Полное время пуска (с некоторой неточностью для последней ступени, так как $M_{\min} > M_m$) будет при $B_k = B$, т. е. при $R_k = R_N$

$$t_p = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + \dots + B_{k-1} + B_k) \cdot \ln \frac{M_{\max} - M_m}{M_{\min} - M_m},$$

Далее

$$t_p = \frac{GD^2}{375 k_1 k_2} (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{k-1} + R_k) \cdot \ln \frac{M_{\max} - M_m}{M_{\min} - M_m}.$$

Обозначая $M_{\min} : M_{\max} = \gamma = \frac{1}{\delta}$, можно написать, что

$$t_p = \frac{GD^2}{375 k_1 k_2} (R_1 + R_1 \gamma + R_1 \gamma^2 + \dots + R_1 \gamma^{k-2} + R_1 \gamma^{k-1}) \cdot \ln \frac{M_{\max} - M_m}{M_{\min} - M_m}.$$

Учитывая, что в скобках имеется геометрическая прогрессия, получим

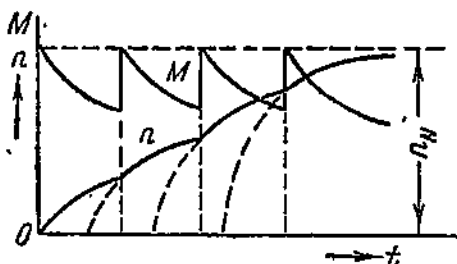
$$t_p = \frac{GD^2 R_1}{375 k_1 k_2} \cdot \frac{\gamma^k - 1}{\gamma - 1} \cdot \ln \frac{M_{\max} - M_m}{M_{\min} - M_m} = B \cdot \frac{R_1}{R_N} \cdot \frac{\gamma^k - 1}{\gamma - 1} \cdot \ln \frac{M_{\max} - M_m}{M_{\min} - M_m}.$$

К получившемуся по формуле значению t_p необходимо добавить время разгона привода на последней ступени от M_{\min} до M_m .

Теоретически это время равно бесконечности, практически (3÷4) B . Таким образом в шунтовом двигателе

$$t_p = \beta \cdot B,$$

где β — постоянный коэффициент, определяемый условиями расчета пусковых сопротивлений, т. е. соотношением M_{\max} и M_{\min} и числом пусковых ступеней.



Фиг. 161. Изменение момента и скорости двигателя при пуске под пусковым реостатом.

Характер кривых M_d и $n_d = n_0(1 - s_d)$ в зависимости от времени для нескольких ступеней пускового сопротивления представлен на фиг. 161. Кривые состоят из отрезков отдельных экспоненциальных кривых, различающихся электромеханической постоянной B .

52. Тормозные режимы электропривода с шунтовой характеристикой при $M_m = \text{const}$

Рассмотрим другие режимы электропривода с шунтовой характеристикой при $M_m = \text{const}$ в соответствии с уравнениями, приведенными ранее в отделе динамики привода. Поскольку работа двигателя при отрицательном статическом моменте нагрузки производится во многих случаях при торможении электродвигателей то сюда же отнесем и работу при отрицательном (постоянном) статическом моменте.

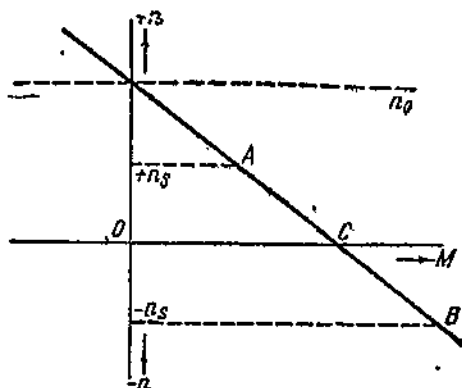
Рассмотрим сначала режим противовключения при M_m положительном. В этом случае до остановки двигателя его момент M_d имеет знак, одинаковый со знаком статического момента, и так же, как последний, стремится остановить электропривод.

На режим противовключения мы переходим с устойчивой точки A (фиг. 162) двигательного режима (когда $M_m = M_{d1}$) переключением обмотки якоря двигателя. Мы сразу попадаем в точку B характеристики, находимую из тех соображений, что скорости для A и B одинаковы по численному значению, ибо в период переключения механическая скорость двигателя практически не меняется. В этом режиме оба момента (статический и двигателя) являются тормозящими. В том случае, если мы динамический момент выражаем через скольжение s , уравнение движения привода следует писать в виде

$$-M_d - M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt}$$

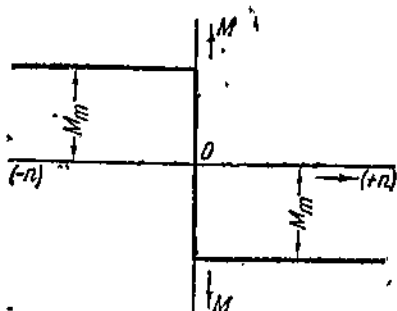
без знака минус в правой части, так как при торможении скольжение уменьшается от 2 (при $n \approx n_0$) до 1 (при $n = 0$).

Изменение знака перед $\frac{ds}{dt}$ происходит из следующих соображений. Момент двигателя M_d в точке C меняет свой знак лишь



Фиг. 162. Переход с двигательного режима в режим противовключения.

условно в соответствии с видоизмененным по схеме направлением вращения двигателя. В этой новой схеме следует рассматривать отрицательным и число оборотов в минуту. Но для этого отрицательного числа оборотов в минуту следует считать отрицательным и реактивный статический момент (момент трения, резания, деформации металла). Для условий такого статического момента нужно считать, что при переходе через $n=0$ от n отрицательного к n положительному он меняет свой знак так же, как и скорость вращения (фиг. 163). Поэтому уравнение движения привода следует писать в форме



Фиг. 163. Изменение знака реактивного статического момента при реверсировании.

$$-M_d - M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{d(-n)}{dt} = -\frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

Уменьшение с отрицательной скорости здесь следует рассматривать как приращение положительной. Меняя знаки на обратные и вводя скольжение, получим

$$M_d + M_m = -\frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \frac{ds}{dt} \quad (268)$$

Решая это уравнение аналогично (258), получим

$$s_d = -s_s (1 - e^{-\frac{t}{B}}) + s_n \cdot e^{-\frac{t}{B}} \quad (269)$$

и

$$M_d = -M_m (1 - e^{-\frac{t}{B}}) + M_n \cdot e^{-\frac{t}{B}} \quad (269')$$

Время, протекающее до остановки привода, t_0 может быть найдено, если в нем положить конечное значение $s_d = 1$

$$1 = -s_s (1 - e^{-\frac{t_0}{B}}) + s_n e^{-\frac{t_0}{B}}$$

Очевидно, что

$$1 + s_s = (s_n + s_s) \cdot e^{-\frac{t_0}{B}}$$

откуда

$$t_0 = B \cdot \ln \frac{s_n + s_s}{1 + s_s} \quad (270)$$

Изменение момента и пропорционального ему тока якоря двигателя происходит по экспоненциальному закону. Некоторый частный пример такого изменения показан на фиг. 164. Нужно иметь в виду, что вследствие разрыва непрерывности в кривой M_m при $n=0$ уравнение (270) пригодно лишь для режима торможения, т. е. до $n=0$. В случае применения противовключения для быстрого реверса двигателя процесс торможения определяется равенством (270) и процесс разгона равенством (267). Время реверсирования при неизменном сопротивлении будет складываться из времени остановки t_0 и времени пуска t_p :

$$t_r = t_0 + t_p = B \cdot \ln \frac{s_n + s_s}{1 + s_s} + B \cdot \ln \frac{1 - s_s}{0,05 s_s}.$$

Рассмотрим режим работы электропривода при противовключении и отрицательном моменте нагрузки. В этом случае противовключение применяется для ограничения скорости спускающегося груза. Здесь момент статический является движущим, а момент двигателя является тормозящим. На основании вышеприведенных соображений получаем

$$-M_d + M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{d(-n)}{dt}, \quad (271)$$

Меняя знаки в (271), получаем

$$M_d - M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = -\frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \frac{ds}{dt}.$$

Решение аналогично двигательному режиму.

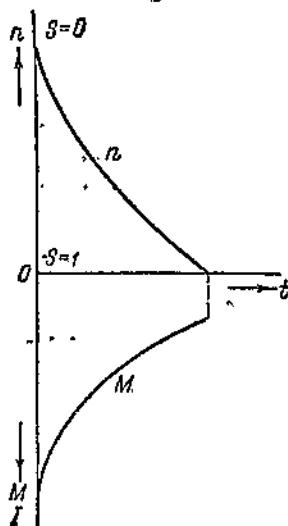
При спуске груза электропривод идет от точки C характеристики фиг. 162 до той точки, в которой будет существовать равновесие между M_d и M_m . Время, протекающее до достижения электроприводом установившейся скорости, будет

$$t = B \cdot \ln \frac{s_n - s_s}{s_d - s_s}. \quad (272)$$

Так как конечное значение $s_d = s_s$, то теоретически время равно опять-таки бесконечности. Практически для подсчетов следует в данном случае принимать $s_d = 0,95 s_s$.

Примерно это время равно (5-7) B .

Совершенно аналогично протекает процесс, если двигатель после переключения оказывается в точке B характеристики при



Фиг. 164. Изменение скорости, тока и момента электропривода при торможении.

нарушении равновесия между M_d и M_m . Смотря по тому, будет ли M_d больше или меньше M_m , электропривод будет или тормозиться или ускоряться. При очень больших значениях M_d привод может дойти до остановки и начать разгоняться в обратную сторону.

Особое положение занимает двигательный режим с отрицательным статическим моментом нагрузки. Здесь M_d и M_m в начале действуют согласно, и уравнение движения привода получает вид

$$M_d + M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = -\frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt},$$

Решение, как и для (268), будет

$$s_d = -s_f (1 - e^{-\frac{t}{B}}) + s_k \cdot e^{-\frac{t}{B}}. \quad (269)$$

Электропривод ускоряется, доходит до n_0 , далее двигатель переходит в генераторный режим с рекуперацией энергии до достижения равновесия между статическим моментом и противодействующим ему генераторным моментом двигателя. Время до прохождения двигателя через n_0 , т. е. до $s_d = 0$ от $s_d = 1$;

$$s_d = 0 = -s_f \left(1 - e^{-\frac{t_2}{B}}\right) + 1 \cdot e^{-\frac{t_2}{B}}$$

и

$$t_2 = B \cdot \ln \frac{1 + s_f}{s_f}. \quad (273)$$

Выше скорости идеального холостого хода уравнение движения привода будет иметь вид

$$-M_d + M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = -\frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \frac{ds}{dt},$$

или, меняя знаки, получим

$$M_d - M_m = \frac{GD^2}{375} n_0 \cdot \frac{ds}{dt}, \quad (274)$$

где величина s — отрицательная. Если же находить численное значение, то перед правой частью равенства (274) нужно поставить знак (—). Решение получит вид, аналогичный (262).

Время достижения равновесного состояния

$$t = B \cdot \ln \frac{s_f - s_k}{s_f - s_{кон}} = B \cdot \ln \frac{s_f}{s_f - s_{кон}}. \quad (275)$$

Теоретически оно равно бесконечности. Практически конечную величину $s_{кон}$ следует принимать равной 0,95 s_f .

Отметим, что во всех приведенных выше равенствах величина $B = B_x$ должна соответствовать сопротивлению цепи якоря R_x .

$$B_x = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_{N_x} = \frac{GD^2 R_x}{375 k_1 k_2}$$

Из изложенного видно, что все возможные виды уравнения движения привода комбинируются, как это было отмечено в п. 20, в равенстве

$$\pm M_d \pm M_m = - \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt} \quad (65)$$

Соответственно все решения определяются равенствами

$$\left. \begin{aligned} s_d &= \pm s_s (1 - e^{-\frac{t}{B}}) + s_n \cdot e^{-\frac{t}{B}}, \\ M_d &= \pm M_m (1 - e^{-\frac{t}{B}}) + M_n \cdot e^{-\frac{t}{B}}. \end{aligned} \right\} \quad (276)$$

Так как ток I пропорционален в шунтовой машине вращающему моменту, то для нее

$$I_d = \pm I_s (1 - e^{-\frac{t}{B}}) + I_n \cdot e^{-\frac{t}{B}} \quad (276')$$

Очевидно, что равенства (276) и (276') могут быть выражены как в относительных единицах, так и в процентах:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_d &= \pm \sigma_s (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}) + \sigma_n \cdot e^{-\frac{\tau}{T}}, \\ \nu_d &= \pm \nu_m (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}) + \nu_n \cdot e^{-\frac{\tau}{T}}, \\ i_{d\psi} &= \pm i_{\psi s} (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}) + i_{\psi n} \cdot e^{-\frac{\tau}{T}}. \end{aligned} \right\} \quad (277)$$

За масштаб времени взята величина B .

В процентах все выражения будут аналогичны, так как

$$\sigma_d \% = \nu_d \% = i_{\psi d} \%,$$

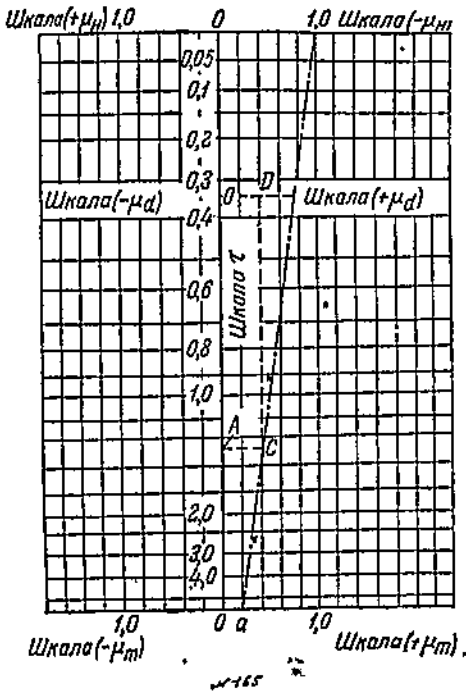
$$\sigma_d \% = \pm \sigma_s \% (1 - e^{-\frac{\tau \%}{100}}) + \sigma_n \% \cdot e^{-\frac{\tau \%}{100}}.$$

Из равенства (277) можно найти как времена переходных режимов, так и отдельные величины. При заданных трех величинах может быть найдена четвертая.

Для нахождения их может быть использована номограмма, разработанная в лаборатории электропривода ЛПИ г. Орловым [л. 94]. Эта номограмма, являющаяся номограммой из выравнен-

ных точек, дана на фиг. 165. Обоснование ее выходит за пределы данного учебника.

На фиг. 165 показаны три горизонтальных шкалы для $(\pm \mu_n)$, $(\pm \mu_d)$, $(\pm \mu_m)$. Вертикальная шкала дает τ . Зная три из этих четырех величин, можно определить четвертую. Производится это следующим образом.



Фиг. 165. Номограмма для определения составляющих решенного уравнения движения электропривода.

Уравнение электропривода в этом случае необходимо решать, оперируя с числом оборотов в минуту. Мы рассмотрим применяемое обычно торможение с независимым возбуждением.

Уравнение движения привода получает вид

$$-M_d - M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

При динамическом торможении

$$M_d = k_n \cdot n. \quad (166')$$

Стало быть

$$-(k_n n + M_m) = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

Положим нам известны μ_m и μ_n . К соответствующим точкам верхней и нижней шкал прикладываем линейку. Если требуется найти μ_d для некоторого времени τ , то из точки A, соответствующей заданному значению τ , проводим до линейки горизонталь. Из точки пересечения C восстанавливаем перпендикуляр до шкалы μ_d , где в точке D и находим нужное значение μ_d . Все остальные построения аналогичны. Номограмма фиг. 165 достаточно точна лишь для $0,5 < B < 4$.

Для $B < 0,5$ следует построить более точную номограмму.

Несколько особое положение в тормозных режимах электропривода с шунтовым двигателем занимает динамическое торможение. Так как двигатель не подключен к сети и $U=0$, то понятие скольжения здесь становится нецелесообразным.

Время торможения до остановки будет

$$t = \frac{GD^2}{375} \int_0^{n_1} \frac{dn}{k_3 n + M_m} = \frac{GD^2}{375} \frac{1}{k_3} \ln \frac{k_3 n_1 + M_m}{M_m} \quad (278)$$

Изменение скорости n и пропорционального ей момента двигателя определится следующим образом:

$$\frac{dn}{k_3 \cdot n + M_m} = - \frac{375}{GD^2} \cdot dt.$$

Интегрируя, получим

$$\frac{1}{k_3} \cdot \ln (k_3 \cdot n + M_m) + \ln C = - \frac{375}{GD^2} \cdot t,$$

где $\ln C$ — подинтегральная постоянная.

При $t=0$ $n=n_1$. Следовательно,

$$\ln C = - \frac{1}{k_3} \ln (k_3 n_1 + M_m),$$

откуда

$$\frac{1}{k_3} \cdot \ln \frac{k_3 n + M_m}{k_3 n_1 + M_m} = - \frac{375}{GD^2} \cdot t$$

или

$$\frac{k_3 \cdot n + M_m}{k_3 n_1 + M_m} = e^{-\frac{k_3 \cdot 375}{GD^2} t}, \quad \text{где } k_3 = \frac{M_N}{n_N}.$$

Обозначим

$$\frac{GD^2 \cdot n_N}{375 \cdot M_N} = B'. \quad (279)$$

В таком случае

$$k_3 \cdot n = M_a = -M_m (1 - e^{-\frac{t}{B'}}) + M_N \cdot e^{-\frac{t}{B'}} \quad (280)$$

или

$$n = -n_s (1 - e^{-\frac{t}{B'}}) + n_N \cdot e^{-\frac{t}{B'}}. \quad (280)$$

Время торможения электропривода до $n=0$ равно

$$t_1 = B' \cdot \ln \frac{M_m + M_N}{M_m}.$$

Таким образом при динамическом торможении электропривода с пунтовым двигателем мы получаем для скорости уравнение, аналогичное уравнению скольжения при других режимах.

Важно отметить, что электромеханическая постоянная динамического торможения $B' \neq B$, аналогичной постоянной для других режимов. Таким образом электромеханическая постоянная зависит

от режима работы электропривода. Назовем постоянной B' постоянной пуска. Она представляет время разгона данного электропривода до скорости n_N при динамическом моменте, равном M_N .

Очевидно, что

$$B' = \frac{GD^2 \cdot n_N}{375 \cdot M_N} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{\frac{\omega_N - 0}{2}}{\frac{P_N}{2}},$$

т. е. B' представляет то время, в течение которого электропривод, разряжаясь равномерно от всего запаса своей живй силы, соответствующего номинальной скорости, мог бы равномерно отдавать мощность $\frac{P_N}{2}$. Как видно будет из последующего, эта постоянная имеет значение также для других типов двигателей (например, серийных, компаундных).

На наш взгляд эта постоянная имеет вообще более общее практическое значение для всех типов двигателей, чем введенная в свое время Рюденбергом применительно к шунтовой машине другая постоянная, названная им нормальным временем пуска:

$$B_2 = \left(\frac{\pi}{60}\right)^2 \cdot \frac{n_0^2 \cdot GD^2}{P_N} = \frac{GD^2 n_0}{375 \cdot M_N} = B \cdot \frac{P_k}{P_N},$$

где P_k — мощность короткого замыкания двигателя.

53. Краткие соображения по определению мощности электропривода с шунтовой характеристикой при включении в цикл работы пуска, установившейся скорости, торможения и паузы

Положим, что в цикл работы электропривода входит пуск двумя ступенями реостата длительностью t_1 , установившаяся работа при $M_m = \cos \alpha t$ длительностью t_2 , торможение противовключением длительностью t_3 двумя ступенями и пауза длительностью t_4 . Регулировки скорости током возбуждения нет. Определим по методу эквивалентного момента необходимую мощность двигателя.

Согласно равенству (263) для периодов пуска:

1) для t_1'

$$M_{\min} = M_m \left(1 - e^{-\frac{t_1'}{B_1}}\right) + M_{\max} \cdot e^{-\frac{t_1'}{B_1}},$$

$$t_1' = B_1 \cdot \ln \frac{M_{\max} - M_m}{M_{\min} - M_m};$$

2) для t_1''

$$M_{\min} = M_m \left(1 - e^{-\frac{t_1''}{B_1'}}\right) + M_{\max} \cdot e^{-\frac{t_1''}{B_1'}}$$

$$t_1'' = B_1' \cdot \ln \frac{M_{\max} - M_m}{M_{\min} - M_m};$$

3) для периода разгона без реостата t_1'''

$$1,05 M_m = M_m \left(1 - e^{-\frac{t_1'''}{B_1''}}\right) + M_{\max} \cdot e^{-\frac{t_1'''}{B_1''}}$$

В период установившейся скорости длительностью t_2 , $M_d = M_m$.
В период торможения противовключением:

1. Для t_3'

$$M_{\text{нач}} = -M_m \left(1 - e^{-\frac{t_3'}{B_1'}}\right) + M_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t_3'}{B_1'}}$$

Время торможения на этой ступени будет

$$t_3' = B_1' \cdot \ln \frac{s_{\text{нач}} + s_s}{s_{\text{кон}} + s_s}$$

2. Для t_3''

$$M_{\text{д кон}} = -M_m \left(1 - e^{-\frac{t_3''}{B_1''}}\right) + M_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t_3''}{B_1''}}$$

Время торможения на этой ступени будет

$$t_3'' = B_1'' \ln \frac{s'_{\text{нач}} + s_s}{s'_{\text{кон}} + s_s} = t_3'' = B_1'' \cdot \ln \frac{s_{\text{кон}} + s_s}{1 + s_s}$$

Эквивалентный момент двигателя будет равен

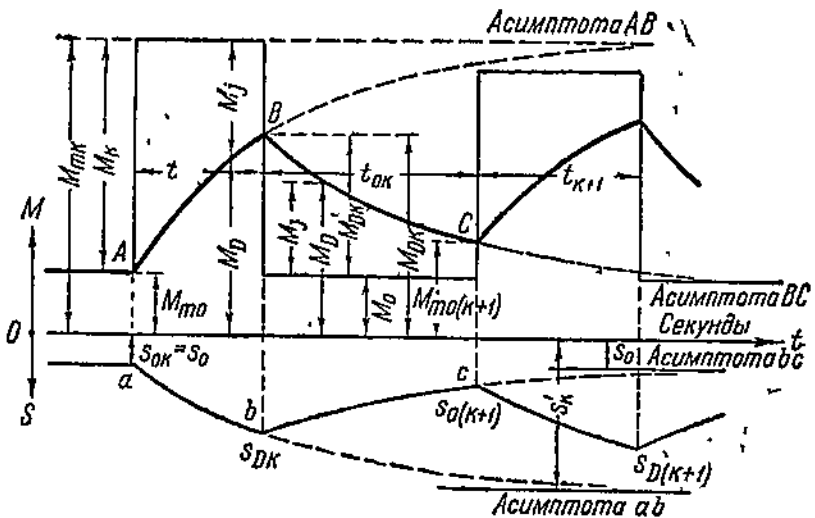
$$M_d = \left(\frac{\sum_0^{t_1'} M_{d1}^2 t_{x1} + \sum_0^{t_1' + t_1''} M_{d2}^2 t_{x2} + \frac{t_1' + t_1'' + t_1'''}{t_1' + t_1''} \cdot M_{d3}^2 t_{x3}}{t_2} + \frac{M_m^2 t_2 + \sum_0^{t_3'} M_{d1}^2 t_{x1} + \frac{t_3' + t_3''}{t_3'} M_{d2}^2 t_{x2}}{t_2} \right)^{1/2}$$

Проверка на перегрузку должна показать, что отношение $\frac{M_{\max}}{M_N} \leq \lambda_M$. Время пуска и торможения должно показать достаточность пускового и тормозного момента двигателя.

54. Переходные режимы двигателя с шунтовой характеристикой при пиковой нагрузке на примере нереверсивного прокатного стана

Рассмотрим условия работы электропривода с шунтовой характеристикой при пиковой нагрузке.

В качестве типичного примера для этого случая возьмем некоторый нереверсивный прокатный стан периодической прокатки. График моментов, требуемых таким станом, иначе говоря, нагрузочная диаграмма собственно прокатного стана $M_m = f(t)$ (прямоугольники) для некоторого частного случая представлена на фиг. 166. Пики нагрузки соответствуют периодам пропуска ме-



Фиг. 166. Нагрузочная диаграмма прокатного стана и его электропривода.

талла через валки. Промежутки между ними соответствуют моменту холостого хода стана. Число пропусков зависит от типа стана и достигает иногда 13—15 и больше. Обычно число пропусков нечетное.

За каждый пропуск момент прокатки, обусловленный объемом деформируемого металла и давлением истечения практически остается постоянным. Однако он меняется от пропуска к пропуску. Не остаются постоянными и длительности пропусков (иногда их называют проходами) и длительности пауз. График в течение цикла получается нерегулярным. Цикл работы t_2 в данном случае соответствует длительности прокатки одного слитка, после чего цикл полностью снова повторяется.

Кривая моментов прокатки $M_m = f(t)$ не может быть выражена каким-либо уравнением. Разложение в ряд чрезвычайно усложнило бы решение, снизив к тому же точность в силу необходи-

мости применения ряда графо-аналитических решений. Значительно целесообразнее рассматривать работу электропривода стана по частям, по отдельным участкам.

В пределах каждого участка M_m должен оставаться постоянным. При этом оказываются полностью применимыми общие выводы, полученные выше для машины с шунтовой характеристикой.

Для любого участка с прокаткой (пропуском) для момента двигателя будет справедливо уравнение

$$M_d = M_{mk} \left(1 - e^{-\frac{t}{2lB}}\right) + M_{dok} e^{-\frac{t}{B}}, \quad (263')$$

где M_{mk} — момент прокатки соответствующего пропуска, а

M_{dok} — момент двигателя в начале этого пропуска.

Для любой паузы (холостого хода) будет применимо уравнение

$$M_d = M_{mo} \left(1 - e^{-\frac{t}{B}}\right) + M_{dk} e^{-\frac{t}{B}}, \quad (263'')$$

где M_{dk} — момент двигателя в начале соответствующей паузы;

M_{mo} — момент холостого хода стана, а

B — электромеханическая постоянная рассматриваемого электропривода.

Выражения для скольжения совершенно аналогичны выражениям для моментов.

Экспоненциальные кривые момента двигателя, построенные по уравнениям (263') и (263''); также показаны на фиг. 163 более жирными линиями. Прежде всего необходимо подчеркнуть еще раз, что форма кривой момента двигателя сильно разнится от кривой момента прокатного стана. Разница происходит за счет работы маховых масс, которые помогают двигателю преодолевать пик нагрузки, отдавая при этом свою живую силу. В свою очередь во время паузы момент двигателя будет больше момента холостого хода за счет динамического момента, необходимого для зарядки маховых масс

$$M_m = f(t) \neq M_d = \varphi(t).$$

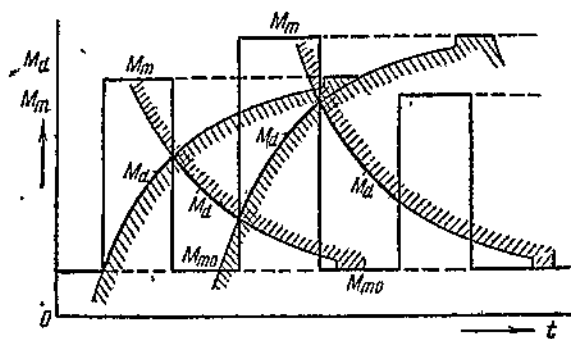
Во всех случаях

$$M_d = M_m + J \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

Кривые момента двигателя могут быть построены по шаблону экспоненциальных кривых. Обоснование пользования шаблоном было дано выше при рассмотрении кривых нагрева (п. 12).

Если при построении кривых нагрева при меняющейся нагрузке шаблон практически неприменим вследствие огромного количества участков, для которых нужно было бы строить кривые изменения температуры, не говоря уже о получающейся при этом малой точности, то здесь использование шаблона вполне рацио-

нально. Шаблон должен быть построен с максимальной ординатой, равной максимальному моменту прокатки. Масштаб времени в нем должен соответствовать масштабу времени на графике моментов прокатки. Параметром шаблона должна быть электромеханическая постоянная B . Асимптотами шаблона при его прикладывании к графику прокатных моментов стана в период роста моментов двигателя должны быть моменты прокатки, в период уменьшения моментов двигателя — моменты холостого хода.



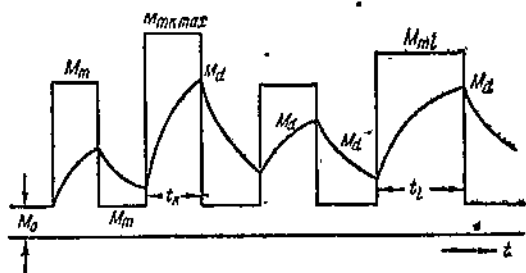
Фиг. 167. Способ пользования шаблоном для построения кривых моментов двигателя прокатного стана.

где построены кривая $M_d = \varphi(t)$ для нескольких участков. Шаблон для M_d и s_{φ} принципиально может быть одним и тем же.

Очевидно, что для решения задачи о переходных режимах электропривода прокатного стана и о мощности двигателя необходимо знать величину постоянной B . Параметры же, определяющие эту электромеханическую постоянную, находятся в свою очередь на основании полученной мощности двигателя. Поэтому к решению задачи вообще необходимо подходить методом последовательного подбора. Практически задача сводится к проверке двигателей разных габаритов.

Решение соответствующих вопросов упрощается, если мы заранее учтем условия перегрузки двигателя.

В ряде случаев толковой нагрузки в электроприводе и в частности при приводе некоторых прокатных станов приходится устанавливать специальные маховики в целях уменьшения толчков нагрузки на сеть и уменьшения мощности двигателя. Современный подход к этому вопросу будет подробно освещен несколько ниже. Здесь отметим лишь, что практически в таких случаях необходимо найти еще и наиболее дешевое решение. При этом важно так сразу



Фиг. 168. Ориентировочное нахождение пропуска с максимальным моментом двигателя.

подобрать маховой момент маховика, чтобы при построении нагрузочных диаграмм оперировать с наименьшим числом вариантов. Это может быть сделано следующим образом [Л. 95]. Маховой момент системы электропривод—исполнительный механизм в случае работы при пиковой нагрузке должен быть подобран так, чтобы перегрузочная способность двигателя была использована по возможности полностью, т. е. чтобы максимальный момент двигателя достигал предельного допустимого значения. Практически обычно можно положить, что момент двигателя будет достигать максимума в конце периода прокатки с максимальным моментом прокатки $M_{mk\max}$, длительностью t_k или в конце периода прокатки с моментом прокатки, близким к максимальному M_{mb} , по наибольшей длительности t_i (фиг. 168).

Наибольший достигаемый двигателем момент в конце одного из этих периодов

$$M_d = M_N \lambda = M_{mk\max} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{B}}\right) + M_{0k\max} \cdot e^{-\frac{t_k}{B}} \quad (281)$$

Отсюда находим, что

$$e^{\frac{t_k}{B}} = \frac{M_{mk\max} - M_{0k\max}}{M_{mk\max} - M_N \lambda}$$

где M_N —номинальный момент двигателя.

Выражая B через ее составляющие ($B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot S_N$), получим

$$GD^2 = \frac{t_k \cdot M_N \cdot 375}{n_0 \cdot S_N} \cdot \frac{1}{\ln \frac{M_{mk\max} - M_{0k\max}}{M_{mk\max} - M_N \lambda}} \quad (282)$$

Так как величина момента двигателя перед пропуском $M_{0k\max}$ до построения кривых неизвестна, то ее приходится принимать грубо равной M_0 .

Из величин, полученных для GD^2 по варианту для $M_{mk\max}$ и варианту для M_b , нужно взять наибольшее значение.

В результате получается следующая методика выбора мощности двигателя для нереверсивного прокатного стана. Имея нагрузочную диаграмму стана $M_m = f(t)$ (фиг. 166), полученную на основании данных о работе прокатки, и зная его $(GD^2)_m$, задаемся ориентировочно номинальной мощностью или номинальным моментом двигателя.

Этот момент может быть принят равным

$$M_N = (1,2 \div 1,3) \cdot M_m$$

где M_{ms} — средний момент нагрузочной диаграммы самого прокатного стана, определяемый по формуле

$$M_{ms} = \frac{\sum_0^{t_s} M_{mx} \cdot t_x}{t_s}$$

Величина $\sum_0^{t_s} M_{mx} \cdot t_x$ должна быть взята за цикл прокатки одного слитка, включая и паузу между двумя соседними слитками. Делая выше указанное допущение, мы как бы предполагаем, что средний момент двигателя равен среднему моменту стана. Коэффициент (1,2÷1,3) учитывает превышение эквивалентного момента двигателя над средним. Имея величину M'_N , обращаемся к каталогу на прокатные двигатели и находим наиболее подходящий по скорости с номинальным моментом M_N по возможности близким к M'_N , скоростью идеального холостого хода n_0 , номинальным скольжением s_N и маховым моментом $(GD^2)_d$. Зная маховой момент стана, можно найти маховой момент системы, приведенный к валу двигателя

$$(GD^2)_1 = (GD^2)_d + \frac{(GD^2)_m}{k^2},$$

где k — передаточное число от двигателя к стану.

Полученные параметры дают возможность найти величину электромеханической постоянной B . Далее обращаемся к равенству (282) и находим необходимый маховой момент привода GD^2 . Разница между GD^2 и $(GD^2)_1$ дает добавочный момент маховика, отнесенный к валу двигателя. Далее, или аналитически или с помощью шаблона строим за один цикл t_s кривую $M_d = f(t)$. Пользуясь этим графиком, определяем эквивалентный момент двигателя по формуле

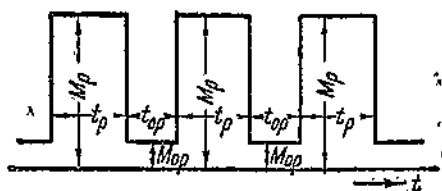
$$M_s = \sqrt{\frac{\sum_0^{t_s} M_d^2 \cdot \Delta t_x}{t_s}}$$

Если полученный момент $M_s = M_N$, расчет окончен. Если $M_s > M_N$, должен быть взят двигатель, следующий по типу большей мощности, и расчет проделан вновь. Если $M_s < M_N$, то должен быть взят двигатель меньшей мощности с моментом $M_N \approx M_s$, и расчет должен быть проделан вновь.

Так как выбор двигателя производился, исходя из его предельной перегрузки, то проверки на перегрузку как будто не требуется. Однако допущенный нами ориентировочный выбор момента при пользовании формулой (282) делает такую проверку, всё-таки необходимой.

Нужно убедиться в том, что $M_{d \max} < M_N \lambda$. Опять-таки, если $M_{d \max} > M_N \lambda$, то должен быть взят другой тип двигателя, в котором $M_N \lambda = M_{d \max}$, и расчет должен быть проделан вновь.

Практическое решение задачи осложняется тем обстоятельством, что при выборе маховика и мощности двигателя принципиально возможно получить очень большое число вариантов. Одна и та же задача может быть решена неоднозначно. Можно взять двигатель большей мощности и меньший маховик и обратно, можно ту же задачу решить большим маховиком и двигателем меньшей мощности. Ранее маховик был совершенно необходимым во многих пиковых приводах для уменьшения толчков тока на станции или подстанции. В современной нашей практике в связи с развитием районных сетей и увеличением мощностей подстанций такая постановка вопроса стала утрачивать свой смысл. Вопрос о выборе параметров маховика, а иногда просто о выборе между маховиковым (с добавочным маховиком) и безмаховиковым приводом перешел в плоскость экономики. Приходится рассматривать несколько возможных вариантов с разными мощностями двигателей и разными маховыми массами и из них выбрать наиболее дешевый по капитальным затратам, с меньшим расходом энергии. При этом нужно иметь еще в виду, что, вводя в цепь двигателя сопротивление, можно достигнуть большего использования маховых масс за счет увеличения скольжения. Это обстоятельство отзывается на потерях в двигателе и средней скорости и еще больше усложняет вопрос. В силу необходимости учитывать экономику дела, вопрос простому математическому анализу не поддается.



Фиг. 169. Пользование методом фиктивной нагрузочной диаграммы.

Отсюда вытекает необходимость быстрого примерного определения мощности двигателей для различных вариантов с тем, чтобы, сделав ориентировочные технико-экономические выводы, можно было выполнить детальный расчет электропривода.

Значительное время, затрачиваемое на построение экспоненциальных кривых, естественно побуждает к разработке упрощенных, но достаточно точных методов. Одним из таких методов может быть метод фиктивной нагрузочной диаграммы. В нем сложная нагрузочная диаграмма неразвернутого прокатного стана с большим количеством пропусков и пауз заменяется простейшей, состоящей из ряда совершенно одинаковых пропусков и пауз с одинаковым значением момента прокатки. Характерными параметрами для фиктивной диаграммы с тем же числом пропусков, что и для действительной, являются момент пропуска M_p , его продолжительность t_p , момент холостого хода M_{op} и его продолжительность t_{op} . Эквивалентные моменты как для действительной, так и для фиктивной диаграммы (фиг. 169) естественно должны быть одинаковы. Стало быть,

$$M_a = \sqrt{\frac{M_p^2 t_p + M_{op}^2 t_{op}}{t_p + t_{op}}} = \sqrt{\frac{\sum_0^n M_p^2 t_x + M_{op}^2 \sum_0^n t_{ox}}{\sum_0^n t_x + \sum_0^n t_{ox}}} \quad (283)$$

Для решения этого равенства можно положить

$$(t_p + t_{0p}) \cdot n = \sum_0^n t_x + \sum_0^n t_{0x}$$

и, наконец,

$$\frac{t_p}{t_{0p}} = \frac{\sum_0^n t_x}{\sum_0^n t_{0x}} \quad (284)$$

отсюда

$$t_p = \frac{\sum_0^n t_x}{n}, \quad t_{0p} = \frac{\sum_0^n t_{0x}}{n}$$

Подставляя (284) в (283) и решая его относительно M_p , получим

$$M_p = \sqrt{\frac{\sum_0^n M_x^2 t_x}{\sum_0^n t_x}} \quad (285)$$

т. е. момент пропуска фиктивной диаграммы равняется среднему квадратичному из моментов пропусков действительной диаграммы.

Имея фиктивную диаграмму, находим моменты двигателя M_1 и M_2 в начале и конце пропуска

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{M_0 \left(1 - e^{-\frac{t_{0p}}{B}}\right) + M_p e^{-\frac{t_{0p}}{B}} \left(1 - e^{-\frac{t_p}{B}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_p - t_{0p}}{B}}} \\ M_2 &= \frac{M_0 e^{-\frac{t_p}{B}} \left(1 - e^{-\frac{t_{0p}}{B}}\right) + M_p \left(1 - e^{-\frac{t_p}{B}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_p - t_{0p}}{B}}} \end{aligned} \right\} \quad (283)$$

Подставляя эти предельные значения в выражение для эквивалентного момента, получим окончательно

$$M_{ds}^2 = \frac{M_p^3 t_p + M_0^3 t_{0p}}{t_p + t_{0p}} - (M_p - M_0) \cdot \frac{B \left(1 - e^{-\frac{t_p}{B}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t_{0p}}{B}}\right)}{(t_p + t_{0p}) \left(1 - e^{-\frac{t_p - t_{0p}}{B}}\right)} \quad (287)$$

Приведенная формула дает достаточно хорошее совпадение с практическими данными и вполне может быть использована для предварительных ориентировочных подсчетов.

Инж. Л. Б. Гейлером сделана попытка более широкого аналитического подхода к рассматриваемой задаче [Л. 96], а именно им посредством ряда несущественных допущений выводится аналитическая зависимость для эквивалентного момента.

Боря для M_d выражение

$$M_d = M_m + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

и возводя его в квадрат, получаем

$$M_d^2 = M_m^2 + 2M_m \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} + \left(\frac{GD^2}{375} \right)^2 \left(\frac{dn}{dt} \right)^2$$

Умножая все члены этого равенства на dt , интегрируя в пределах от 0 до t_z и извлекая корень, получим

$$M_d = \sqrt{\int_0^{t_z} M_m^2 dt + 2M_m \frac{GD^2}{375} \int_0^{t_z} dn + \left(\frac{GD^2}{375} \right)^2 \int_0^{t_z} \left(\frac{dn}{dt} \right)^2 dt} \quad (288)$$

$$\text{Так как } n = n_0(1 - s_d) = n_0 \left(1 - M_d \frac{s_N}{M_N} \right), \quad \text{то } dn = -n_0 \frac{s_N}{M_N} \cdot dM_d.$$

Подставляя это равенство в (288) и заменяя $\frac{GD^2 \cdot n_0}{375 M_N} \cdot s_N = B$, получим

$$M_d = \sqrt{\int_0^{t_z} M_m^2 dt - 2B M_m \int_0^{t_z} \frac{dM_d}{dt} \cdot dt + B^2 \int_0^{t_z} \left(\frac{dM_d}{dt} \right)^2 dt} \quad (289)$$

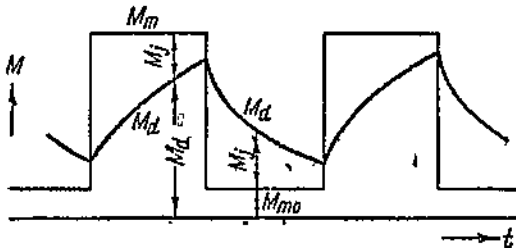
Поскольку функция M_m для прокатного стана не поддается аналитическому выражению, то точное интегрирование равенства (289) произведено естественно быть не может. Кроме того оно требует написания функции $M_d = f(t)$ для каждого участка, т. е. требует вычисления значений M_d в начале и конце каждого пропуска и каждой паузы. Производя ряд длительных выкладок, которые мы здесь опускаем, Гейлер получает для эквивалентного момента формулу

$$M_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_k^2 t_k M_0^2 \sum_1^n t_{0k}}{t_z} - \frac{B}{t_z} \sum_1^n (M_{dk} - M_{0k}) (M_k - M_0)}, \quad (290)$$

где M_0 — момент холостого хода стана; M_k — момент прокатки для k -того пропуска; M_{dk} — момент двигателя в конце k -того пропуска; t_k и t_{0k} — длительности пропусков и пауз.

55. Краткие соображения о работе маховых масс в приводе с пиковой нагрузкой

На фиг. 170 представлен график регулярной ударной (пиковой) нагрузки некоторого механизма, например, штампа. Там же показан и момент, развиваемый двигателем M_d . Во время пика нагрузки статический момент покрывается моментом двигателя и динамическим моментом



$$|M_m| = |M_d| + |M_j|.$$

Во время холостого хода механизма момент двигателя M_d должен преодолевать момент холостого хода и динамический момент M_j ,

$$|M_d| = |M_0| + |M_j|.$$

Фиг. 170. График регулярной пиковой нагрузки.

Очевидно, что увеличение маховых масс снижает максимальный момент двигателя графика. Однако величина динамического момента, способствующего двигателю преодолеть пик нагрузки, зависит от двух факторов — от махового момента и допускаемого скольжения. Запасаемая маховыми массами живая сила при числе оборотов в минуту n будет равна

$$A = \frac{J\omega^2}{2} = \frac{GD^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} = \frac{GD^2 \cdot n^2}{7200} \text{ килограммометров,} \quad (291)$$

или же

$$A = \frac{GD^2 \cdot n^2}{7200 \cdot 10^3} = \frac{GD^2 n^2}{729000} \text{ киловаттсекунд.} \quad (291')$$

Приведенное выражение представляет полную живую силу, запасаемую маховыми массами. При работе электропривода используется не вся живая сила, а только такая ее часть, которая приходится на допущенное при расчете и зависящее от условий работы производственного механизма падение скорости двигателя.

Отданную маховыми массами при работе живую силу характеризуют обычно в процентах от максимальной допустимой в приводе скорости ω_1 . При этом

$$\frac{A_1 - A_2}{A_1} = \frac{J\omega_1^2 - J\omega_2^2}{J\omega_1^2} = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} = \frac{(n_1 - n_2)(n_1 + n_2)}{n_1^2}, \quad (292)$$

где n_1 — максимальное число оборотов в минуту, которого может достигнуть маховик, практически почти равное числу оборотов в минуту идеального холостого хода n_0 в шлицевых машинах и

синхронному — в асинхронных, а n_2 — минимальное получающееся при работе число оборотов в минуту.

Так как $n_2 = n_1(1 - s)$, где s — скольжение двигателя, то

$$\frac{A_1 - A_2}{A_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad \frac{n_1 + n_2^2}{n_1} = s, \quad \frac{n_1 + n_1(1 - s)}{n_1} = (2 - s) \cdot s = 2s - s^2,$$

Отдаваемая маховыми массами живая сила будет равна

$$\Delta A = \frac{GD^2 n_1^2}{729\,000} s \cdot (2 - s) \quad \text{киловаттсекунд,} \quad (293)$$

откуда потребный маховой момент

$$GD^2 = \frac{729\,000 \Delta A}{n_1^2 s \cdot (2 - s)}, \quad (293')$$

Ниже в таблице показана отдаваемая маховыми массами энергия в процентах в зависимости от допускаемого падения скорости электропривода.

Таблица показывает, что наилучшее использование маховых масс мы получаем в том случае, когда снижение скорости не очень значительно.

В самом деле, при снижении скорости на 20% от максимальной мы используем уже 36% живой силы маховика. Поэтому падение скорости маховых масс большее, чем на 20%, обычно не допускают из-за ухудшающегося их использования. Кроме того более сильное снижение скорости вело бы к пониженной производительности исполнительного механизма.

Производительность определяется по существу средней скоростью электропривода

$$n_m = n_0(1 - s_m),$$

где s_m — среднее скольжение, равное $s_N \cdot \frac{M_{md}}{M_N}$.

Но средний момент двигателя за цикл M_{md}

$$M_{md} = \frac{1}{t_2} \int_0^{t_2} M_d \cdot dt = \frac{1}{t_2} \int_0^{t_2} M_m \cdot dt + \frac{1}{t_2} \cdot \frac{GD^2}{375} \int_{n_1}^{n_2} dn.$$

При установившемся процессе второй интеграл правой части будет равен нулю, так как исходная скорость цикла и конечная скорость следующего цикла будут одинаковы.

Таблица X

Падение n в % от максимального	Отданная мах. м. ссами энергия в % от максимальной
0	0
10	19
20	36
30	51
40	64
50	75
60	84
70	91
80	96
90	99
100	100

В таком случае

$$M_{md} = \frac{\int_0^{t_c} M_m dt}{t_c}$$

т. е. средний момент двигателя за цикл будет равен среднему арифметическому статического момента. Обозначим его через M_{mm} . В таком случае $M_{md} = M_{mm}$.

Следовательно, среднее число оборотов в минуту за цикл

$$n_m = n_0 \left(1 - s_N \cdot \frac{M_{mm}}{M_N} \right),$$

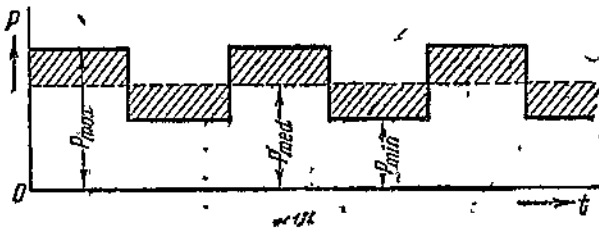
Так как

$$s_N = \frac{375 \cdot M_N \cdot B}{n_0 \cdot GD^2},$$

то

$$n_m = n_0 \left(1 - M_{mm} \cdot \frac{375 \cdot B}{n_0 \cdot GD^2} \right). \quad (294)$$

Нужно отметить, что методика выбора маховика электропривода в силу специфических перегрузочных свойств электродвигателей и характера работы последних отличается от выбора маховика при паровых машинах и двигателях внутреннего сгорания. При применении этих последних для привода исполнительных механизмов к выбору маховика подходят обычно следующим образом. Положим, что мы имеем график нагрузки, представленный на фиг. 171. Для



Фиг. 171. Неправильный способ определения маховых масс для электропривода

этого графика находят среднюю мощность P_m . Далее полагают, что в течение всего периода работы двигателя неизменно дается средняя мощность. При этом очевидно, что верхняя лежащая выше средней мощности заштрихованная площадь представляет ту энергию, которая должна отдаваться маховиком. Положим, что наибольшая из заштрихованных площадей равна ΔA_{\max} в килограммограмах. В таком случае

$$GD^2 = \frac{729\,000 \cdot \Delta A_{\max}}{n_0^2 \cdot s \cdot (2 - s)},$$

В приводах от тепловых двигателей вводят понятие средней скорости n'_m и коэффициента неравномерности i

$$n'_m = \frac{n_{\max} + n_{\min}}{2}; \quad i = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n'_m}.$$

Полагая, что $n_{\max} = n_0$, можно написать

$$GD^2 = \frac{729\,000 \Delta A_{\max}}{n_{\max}^2 - n_{\min}^2} = \frac{729\,000 \cdot \Delta A_{\max}}{2n^2 n_i}$$

При этом исходят из следующих коэффициентов неравномерности для различных исполнительных механизмов, установленных опытом на базе технологических требований и производительности:

Бумагопрядильные фабрики	. 1/60 — 1/100
Ткацкие, пилебумажные, мукомольные машины	. . 1/40 — 1/50
Металлообрабатывающие станки 1/30 — 1/40
Насосы, ножницы 1/5 — 1/30

Подобный подход к выбору маховых масс в электроприводе, работающем при пиковой нагрузке, не рационален, так как он не учитывает действительного закона изменения момента двигателя. В этом случае необходимо базироваться на равенствах (281) и (282).

Выбор махового момента GD^2 для регулярного пикового электропривода связан с соблюдением одного обязательного условия, а именно: маховые массы должны успевать заряжаться полностью за холостой ход привода. Теоретически полная зарядка маховых масс достигается лишь в бесконечности. Однако, как отмечено выше, практически уже при $t_0 = (4+5) \cdot B$ мы получаем почти полную зарядку маховика. Отсюда следует, что величина маховых масс привода тесно связана с длительностью холостого хода и должна быть выбрана так, чтобы $B = \frac{GD^2 \cdot n_0 \cdot s_N}{375 \cdot M_N} < \frac{t_0}{5}$.

При выборе величины B для проектируемого электропривода нужно иметь в виду, как уже отмечено выше, два обстоятельства:

1. Увеличение B влечет за собой уменьшение эквивалентного момента двигателя за счет большего использования маховых масс.

2. Большое значение B вызывает возрастание потерь энергии в электроприводе. Перевес одного фактора над другим определяется экономическими соображениями. Поскольку выбор величины B , характеризующей использование маховых масс в приводе, в основном связан с длительностью паузы, то, очевидно, мы имеем некоторое максимальное значение B , допустимое для данной рабочей машины, равное $\frac{t_0}{5}$.

Выбор GD^2 , M_N , и s_N можно делать, исходя из этого максимального значения $B_{\max} = \frac{t_0}{5}$.

Так как одинаковый динамический момент может быть получен как большей величиной GD^2 и меньшим значением s_N и наоборот меньшей величиной GD^2 и большим значением s_N , то прежде всего необходимо разграничить выбор величин GD^2 и s_N .

Из выражения для B находим

$$GD^2 = \frac{375 \cdot B \cdot M_N}{n_0 \cdot s_N}$$

Так как

$$n_N = n_0 (1 - s_N); \quad \text{а} \quad M_N = 0,975 \cdot \frac{P_N}{n_N},$$

то

$$GD^2 = 375 \cdot B \cdot 0,975 \cdot \frac{P_N}{n_0^2 \cdot s_N (1 - s_N)}$$

Подсчеты показывают, что произведение $B \cdot P_N \approx \text{const.}$

Точно так же постоянно и число оборотов в минуту n_0 .

Обозначим через $k = 375 \cdot 0,975 \cdot \frac{P_N}{n_0^2} \cdot B$.

В таком случае

$$GD^2 = \frac{k}{s_N - s_N^2}$$

Полученное уравнение представляет кривую второго порядка с минимумом в точке $s_N = \frac{1}{2}$, ибо в точке минимума производная

$$\frac{d(GD^2)}{ds_N} = \frac{k(1 - 2s_N)}{(s_N - s_N^2)^2} = 0.$$

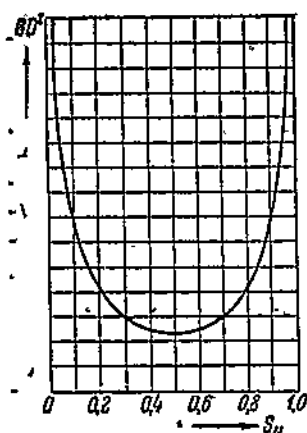
Характер изменения кривой GD^2 в зависимости от s_N представлен на фиг. 172.

Таким образом минимальный маховой момент получается при $s_N = \frac{1}{2}$.

Однако такой выбор GD^2 повлеч бы за собой значительное снижение производительности и большие потери в добавочных сопротивлениях в цепи двигателя. Поэтому обычно маховик выбирают так, чтобы максимальное скольжение в электроприводах с маховиком было не больше 20% и лишь в отдельных случаях, стремясь обойтись безмаховиковым приводом (например, ножницы для резки железа), допускают максимальное скольжение до 50%.

Дальнейший анализ этого вопроса дан в статье Попова и Бегишева [Л., 100].

Там же приведены некоторые данные для определения эквивалентного момента в пиковых приводах с регулярной нагрузкой при условии полной зарядки маховика во время пауз.



Фиг. 172. Изменение GD^2 в зависимости от s_N .

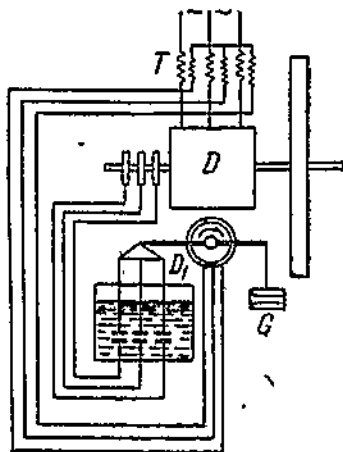
Гейлером [Л. 96] дан подробный анализ вопроса устойчивости и потерь в меди ротора и статора асинхронного двигателя, работающего с маховиком. Нужно иметь в виду, что окончательные выводы о наиболее выгодном решении могут быть сделаны лишь на основании экономических подсчетов.

56. Система Ильгнера

Электроприводы с маховиком могут быть естественно электроприводами как постоянного, так и переменного тока. Однако на практике электроприводы с маховиком для прокатных станов чаще всего осуществляются с асинхронным двигателем. Подобная система носит название системы Ильгнера. Ее принципиальная схема представлена на фиг. 173. Особенность ее представляет применение так называемого регулятора скольжения, т. е. автоматически регулируемого реостата в цепи ротора. Задача регулятора скольжения заключается в автоматическом ограничении нагрузки двигателя в период пиков некоторой предельной величиной.

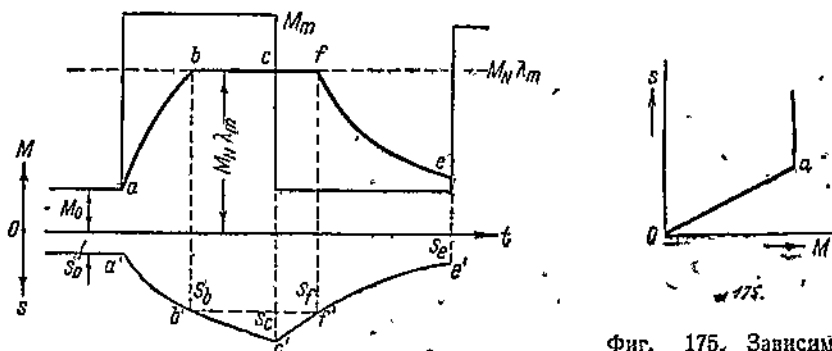
Регуляторы скольжения бывают двух типов: жидкостные и контакторные. Рассмотрим сначала условия работы регуляторов первого типа. Схема включения асинхронного двигателя с жидкостным регулятором скольжения приведена на фиг. 173. Для осуществления регулировки в цепь статора асинхронного двигателя D через последовательный трансформатор T включается небольшой короткозамкнутый асинхронный двигатель D_1 рассчитанный с точки зрения нагрева на работу в неподвижном состоянии. Вал этого двигателя связан с рычагом или шкивом, на который действуют кроме момента двигателя два других вращающих момента: один от веса электродов жидкостного реостата, второй от груза G , величину которого можно менять надбавкой большего или меньшего числа металлических дисков.

Двигатель D_1 создает вращающий момент в том же направлении, что и грузы. Поскольку двигатель D_1 включен через последовательный трансформатор и работает все время в режиме короткого замыкания, то его вращающий момент определяется протекающим через главный двигатель током. Вес груза G и момент регулировочного двигателя подбираются так, что при силе тока главного двигателя $I < I_N \cdot \lambda_1$ (обычно λ_1 берется 1,75) момент двигателя D_1 вместе с грузом оказывается недостаточным для того,



Фиг. 173. Система Ильгнера.

чтобы поднять электроды жидкостного реостата. Асинхронный двигатель в этом случае работает при отсутствии сопротивления в роторе. Но как только сила тока главного двигателя D достигает $I = I_N \lambda_1$ за счет увеличения нагрузки рабочей машины, суммарный момент двигателя D_1 и груза G перевешивает момент, обусловливаемый весом электродов. Электроды постепенно начинают раздвигаться, добавочное сопротивление в цепи ротора плавно увеличивается притом таким образом, что сила тока главного двигателя $I = I_N \lambda_1$ во все время перегрузки. Если перегрузка спадет, то момент от веса электродов преодолевает момент двигателя D_1 с грузом, и электроды возвращаются в исходное положение, т. е. выводят добавочное сопротивление из цепи ротора. При колеблющейся перегрузке двигатель, непрерывно качаясь, поворачивается на некоторый угол то в одну, то в другую сторону. Тем самым достигается компаундирование асинхронного двигателя. Нагрузочная диаграмма асинхронного двигателя с регулятором скольжения принимает вид фиг. 174,



Фиг. 174. Нагрузочные диаграммы асинхронного двигателя при работе с жидкостным регулятором скольжения.

Фиг. 175. Зависимость момента двигателя от скольжения при жидкостном регуляторе скольжения.

где представлена кривая момента прокатки и кривая момента двигателя. После достижения в точке b предельной перегрузки, равной $M_d = M_N \cdot \lambda_m$, момент двигателя увеличиться не должен. Весь избыточный момент нагрузки, равный $(M_m - M_N \cdot \lambda_m)$, должен покрываться маховиком. Регулятор скольжения компаундирует двигатель лишь после достижения некоторой определенной скорости, выше которой компаундирования нет.

Зависимость между моментом и скольжением асинхронного двигателя для подобных условий представлена на фиг. 175.

До точки b момент двигателя изменяется по уравнению

$$M_d = M_m (1 - e^{-\frac{t}{B}}) + M_{0m} e^{-\frac{t}{B}}$$

По совершенно-аналогичной кривой меняется и скольжение

$$s_d = s_s \left(1 - e^{-\frac{t}{B}}\right) + s_{0s} e^{-\frac{t}{B}}.$$

Точка b находится легко, так как в ней $M_d = M_N \cdot \lambda_m$. После достижения точки b момент двигателя $M_d = M_N \cdot \lambda_m = \text{const.}$

При построении нагрузочной диаграммы электропривода прокатного стана с постоянным сопротивлением в цепи ротора построения кривой скольжения не требовалось. Здесь же построение этой кривой совершенно необходимо для нахождения точки f . Точка f находится из тех соображений, что скольжение двигателя в точках b и f должно быть одинаковым, т. е. $s_b = s_f$, ибо сопротивление жидкостного реостата должно быть выведено из цепи ротора при том же скольжении, при котором оно выводится. Только в этом случае работа регулировочного двигателя D_1 будет начинаться и кончаться при одной и той же силе тока. Некоторым расхождением тока трогания и тока остановки регулировочного двигателя для простоты пренебрегаем.

Закон изменения скольжения может быть найден из уравнения движения электропривода. Для участка между точками b и c оно может быть написано так:

$$M_N \cdot \lambda_m + M_m = -\frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt},$$

откуда

$$s_d = \frac{M_m - M_N \cdot \lambda_m}{\frac{GD^2}{375} \cdot n_0} t + s_b, \quad (295)$$

так как при $t=0$, т. е. в точке b , от которой начинается новый закон изменения скольжения $s=s_b$. Следовательно, между точками b и c скольжение изменяется по прямой линии, а не по экспоненциальному закону, как то имеет место в промежутке между точками a и b . Скольжение в точке c

$$s_c = \frac{M_m - M_N \cdot \lambda_m}{\frac{GD^2}{375} \cdot n_0} t_{bc} + s_b.$$

Между точками c и f скольжение убывает. Уравнение движения принимает вид:

$$\frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt} + M_N \cdot \lambda_m = M_0, \quad (296)$$

откуда

$$s_d = s_c - \frac{M_N \cdot \lambda_m - M_0}{\frac{GD^2}{375} \cdot n_0} \cdot t. \quad (297)$$

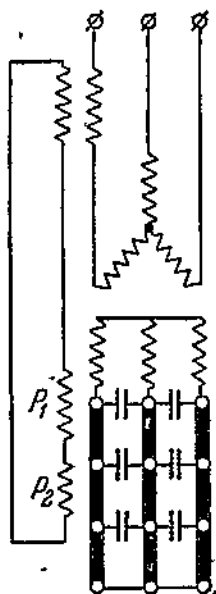
По этому равенству находится положение точки f .

Все остальное построение ясно из чертежа. За точкой f момент двигателя меняется по равенству

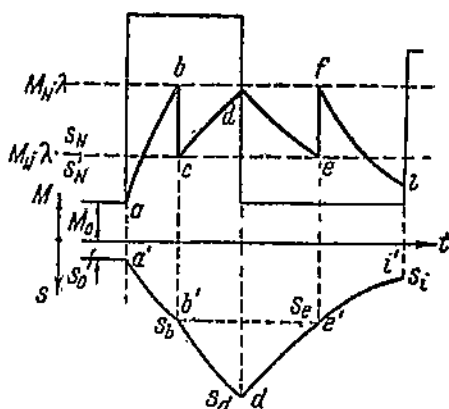
$$M_d = M_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{B}}\right) + M_N \cdot \lambda_{\mu} \cdot e^{-\frac{t}{B}}.$$

Жидкостный регулятор скольжения до последнего времени широко используется в заграничной практике [Л. 102].

Большое занимаемое им место, а в ряде случаев и недостаточная чувствительность побудили ХЭМЗ к использованию контакторных регуляторов скольжения, которые в заграничной практике долго считались недостаточно чувствительными для приводов прокатных станов. Принципиальная схема контакторного регулятора скольжения представлена на фиг. 176. Особенность его заключается в том, что сопротивления вводятся в ротор не плавно, а одной или двумя ступенями.



Фиг. 176. Принципиальная схема контакторного регулятора скольжения.



Фиг. 177. Нагрузочная диаграмма асинхронного двигателя с контакторным регулятором скольжения.

пенями под влиянием последовательных реле p_1 и p_2 , включенных в цепь статора двигателя. Нагрузочная диаграмма для этого случая $M_d = f(t)$ и $s_d = \varphi(t)$ представлена на фиг. 177.

Для нахождения кривой момента двигателя построение кривой s_d здесь в отличие от жидкостного регулятора скольжения необязательно.

Положим, что обмотка ротора имеет активное сопротивление R_r , а добавочное сопротивление, вводимое контактором, будет R_d . Предельный допустимый момент двигателя будет равен $M_N \cdot \lambda_{\mu}$.

В таком случае от точки a до точки b момент двигателя меняется по экспоненциальной кривой

$$M_d = M_m \left(1 - e^{-\frac{t}{B}}\right) + M_0 \cdot e^{-\frac{t}{B}},$$

где B — электромеханическая постоянная электропривода. В точке b момент двигателя равен $M_N \cdot \lambda_m$. Это дает возможность найти точку b . В ней происходит включение в ротор добавочного сопротивления R_d . Экспоненциальный характер кривой момента двигателя сохраняется и дальше, однако меняется электромеханическая постоянная. Вместо $B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_N$ она становится равной

$$B' = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_N',$$

где

$$\frac{s_N'}{s_N} = \frac{R_2}{R_2 + R_d}.$$

В точке b момент двигателя вследствие включения в ротор добавочного сопротивления сразу падает от величины $M_N \lambda_m$ до величины $M_N \cdot \lambda_m \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_d}$.

Далее момент меняется по кривой

$$M_d = M_m \left(1 - e^{-\frac{t}{B}}\right) + M_N \cdot \lambda_m \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_d} \cdot e^{-\frac{t}{B}}.$$

От точки d до точки e , в которой $M_{de} = M_N \cdot \lambda_m \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_d}$, момент двигателя меняется по кривой

$$M_d = M_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{B'}}\right) + M_{de} \cdot e^{-\frac{t}{B'}}.$$

В точке e происходит выключение сопротивления R_d . Момент сразу увеличивается до величины $M_N \lambda_m$ и далее меняется по экспоненциальной кривой

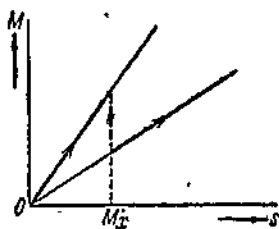
$$M_d = M_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{B}}\right) + M_N \cdot \lambda_m \cdot e^{-\frac{t}{B}}.$$

Кривая скольжения меняется по аналогичным экспонентам, но не имеет скачков, а только переломы экспонент при переходе от одной постоянной B к другой B' .

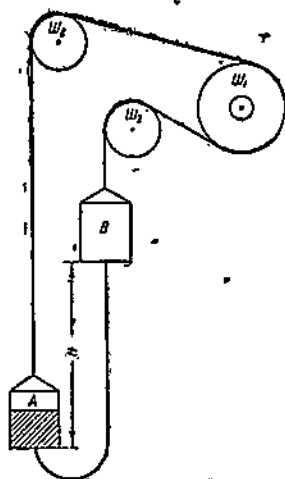
Кривая момента двигателя в зависимости от скольжения в этом случае меняется согласно фиг. 178. Более детальное рассмотрение работы двигателя с регулятором скольжения дано проф. Ароновым [Л. 6]. Аналитический вывод формулы эквивалентного момента для рассматриваемого случая дан Шубенко [Л. 97].

57. Нагрузочные диаграммы электроприводов шахтного подъемника с уравновешенным канатом и особенности диаграмм строгального станка и реверсивного прокатного стана

В ряде случаев, где точность в определении длительности переходных режимов и характера изменения момента двигателя и скорости не имеет существенного значения, прибегают к практическому использованию упрощенных нагрузочных диаграмм. В этих диаграммах полагают, что момент двигателя во время пуска не меняется по экспоненциальным кривым, а остается постоянным и равным среднему значению. Такое же предположение делается и для режима торможения. При этом ускорение и замедление электропривода во время пуска и торможения остаются постоянными, и скорость (вместо действительного характера, определяемого рядом отрезков экспоненциальных кривых) меняется по закону прямой линии.



Фиг. 178. Зависимость момента двигателя от скольжения при контакторном регуляторе скольжения.



Фиг. 179. Схема шахтного подъемника с уравновешенным канатом и шкивом трения Кёне.

В качестве примера с использованием подобных диаграмм следует отнести уравновешенный шахтный подъемник с $M_m = \text{const}$. Этот пример включает в себя сравнительно простое приведение вращательного движения к поступательному и содержит простое решение задач динамики привода. Это следует считать весьма типичным для теории электропривода.

В качестве примера с использованием подобных диаграмм следует отнести уравновешенный шахтный подъемник с $M_m = \text{const}$. Этот пример включает в себя сравнительно простое приведение вращательного движения к поступательному и содержит простое решение задач динамики привода. Это следует считать весьма типичным для теории электропривода.

Схема привода шахтного подъемника со шкивом трения представлена на фиг. 179.

На нем А и В — клетки, в которых поднимается или опускается груз $Ш_1$ — шкив Кёне — шкив трения, непосредственно сочлененный с двигателем; $Ш_2$ — направляющие шкивы.

В системе со шкивом трения канат не закреплен, как то имеет место в подъемниках с барабаном, а держится исключительно силой трения. Условие, при котором соблюдается возможность работы такой

системы, вытекает из фиг. 180. На канат действуют три силы:

- 1) сила тяжести клетки и каната F_1 с одной стороны шкива;
- 2) сила тяжести клетки с грузом и каната с другой стороны шкива F_2 ;
- 3) сила трения F .

Из фиг. 180 можно написать условие статического равновесия сил, действующих на элемент троса, соответствующий углу обхвата $d\varphi$:

$$dN = F \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + (F + dF) \cdot \sin \frac{d\varphi}{2},$$

где dN — нормальное давление шкива на трос на элементе $d\varphi$.

Пренебрегая бесконечно малой величиной dF и принимая (вследствие малости угла $d\varphi$), что

$$\sin \frac{d\varphi}{2} = \frac{d\varphi}{2},$$

получаем

$$dN = F \cdot d\varphi.$$

Условие равенства моментов сил относительно оси 0 дает

$$(F + dF) \cdot \frac{D}{2} = F \cdot \frac{D}{2} + \mu \cdot dN \cdot \frac{D}{2},$$

где $\mu = 0,15$ для железа и стали и $0,25$ для дерева.

Решая два вышеуказанных уравнения совместно, получаем

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu\beta},$$

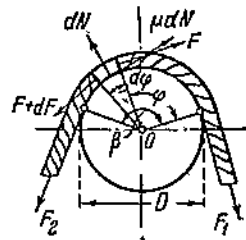
где e — основание натуральных логарифмов; β — угол обхвата тросом шкива, лежащий в пределах от 190 до 270° .

Очевидно, что система может работать только в том случае, если не будет скольжения каната по шкиву. Это будет выполняться лишь при соблюдении неравенства

$$\frac{F_2}{F_1} < (0,6 \div 0,8) e^{\mu\beta}. \quad (298)$$

Такое соотношение удастся получить лишь при применении уравновешивающего каната (фиг. 179), подвешенного под клетями. Благодаря этому канату веса тросов в правой и левой части всегда выравниваются, и при одной пустой клетке удастся соблюсти неравенство (298).

Рассмотрим сначала принципиальное определение мощности двигателя для такого подъемника, а затем применим его на конкретном примере.



Фиг. 180. Силы, действующие на шкив трения.

Выбираем предварительно мощность двигателя

$$P = \frac{G \cdot v}{\eta_n \cdot 102} = \frac{G' \cdot a}{102} \text{ киловатт,}$$

где G — полезный поднимаемый груз; v — номинальная скорость в м/сек, η_n — к. п. д. подъемника. $G' = \frac{G}{\eta_n} = 1,20 G$. Сочленение шкива Кёне с двигателем непосредственное, следовательно, число оборотов шкива и двигателя одно и то же. По каталожным данным выбираем GD^2 двигателя.

На фиг. 181 внизу представлена задаваемая производителем шахты и механическим оборудованием подъемника диа-

грамма скорости $v=f(t)$ для одного цикла подъема.

Мы будем производить построение нагрузочной диаграммы двигателя лишь для одного цикла подъема, так как для применения метода эквивалентного момента достаточно рассмотрения одного цикла.

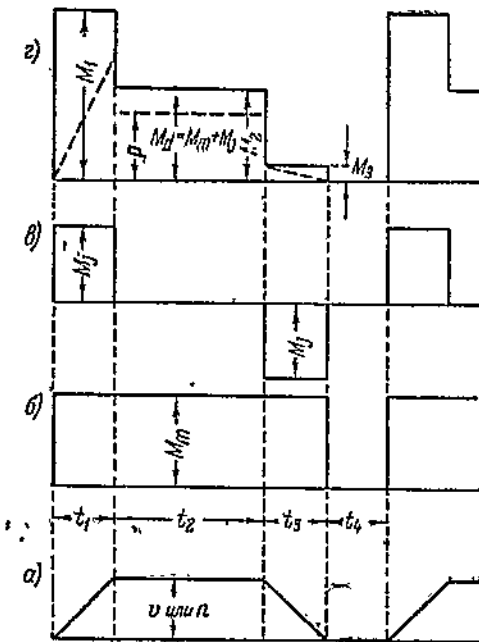
Задача построения нагрузочной диаграммы заключается в нахождении моментов двигателя. Диаграмма скорости в данном случае задана. Выполнение заданной диаграммы скорости достигается регулировочными приспособлениями на двигателе (реостаты, тормозы и т. д.).

Двигатель подъемника должен преодолевать два момента: статический, обусловленный подъемом груза M_m , и динамический M_d , необходимый для ускорения или замедления масс.

Фиг. 181. Принципиальная нагрузочная диаграмма шахтного подъемника с уравновешенным канатом.

Определим сначала величину статического момента. Поскольку веса клеток и троса с правой и левой стороны уравновешиваются, необходимое для работы подъемника статическое усилие равняется весу полезного груза. Однако, учитывая потери в системе на трение (к. п. д. системы), принимаем вес груза на 20% больше:

$$F_m = 1,2 \cdot G,$$



где G — полезный груз клетей. Очевидно, что

$$M_m = F_m \cdot R_k,$$

где R_k — радиус шкива Кёпе, ибо усилие F_m действует на окружности этого шкива. Так как подъем груза происходит в течение всего периода ($t_1 + t_2 + t_3$) (фиг. 181), то статический момент действует в течение всего промежутка ($t_1 + t_2 + t_3$). Ввиду того что веса клетей и канатов в правой и левой частях уравновешиваются, вес поднимаемого груза за время одного подъема остается постоянным. Следовательно, неизменен и статический момент, представленный графиком M_m на фиг. 181.

Кроме статического момента двигатель должен преодолевать момент динамический M_j , необходимый для ускорения и замедления масс. Этот момент действует лишь при изменении скорости, т. е. в периоды t_1 и t_3 . В период t_1 двигатель должен ускорять массы, т. е. должен преодолевать динамический момент. В период замедления t_3 живая сила маховых масс отдается механической системой обратно, т. е. помогает двигателю выполнять полезную работу — подъем груза. Динамический момент в период замедления отрицателен. Если динамический момент в период замедления окажется больше статического, то двигатель может работать генератором, расходуя вырабатываемую энергию в сопротивлении или же, как то может быть выполнено в некоторых схемах, отдавая энергию обратно в сеть.

В рассматриваемом подъемнике имеются как вращательное движение (двигатель, шкив Кёпе, направляющие шкивы), так и поступательное (груз, клетки, канат). Динамический момент мы можем выражать, относя движущиеся массы или к вращательному движению или к поступательному.

В первом случае

$$M_j = J \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

где J — момент инерции системы, приведенный к оси с угловой скоростью ω (двигателя или шкива Кёпе).

Во втором случае

$$F_j = m \cdot \frac{dv}{dt},$$

где m — приведенная масса всей системы, отнесенная к скорости v (скорости груза, клетей, каната).

Ввиду того что скорость рассматриваемого нами подъемника изменяется по закону прямой линии, т. е. ускорение (или соответственно замедление) остается постоянным, динамическое усилие (или динамический момент) за период ускорения (или замедления) остается постоянным. График динамических моментов также представлен на фиг. 181.

При вычислении приведенного момента инерции или приведенной массы системы необходимо учесть и полезный груз.

Масса частей, движущихся поступательно, равна их весу, деленному на ускорение силы тяжести т. е.

$$m = \frac{G}{g},$$

Вес частей, движущихся поступательно, может быть получен простым суммированием отдельных весов, так как все эти части движутся с одной линейной скоростью.

Моментом инерции двигателя приходится задаваться, исходя из предварительно выбранной мощности. Моменты инерции двигателя и шкива Кёпе могут быть сложены вместе, так как двигатель и шкив вращаются с одной угловой скоростью. Что же касается моментов инерции направляющих шкивов, то они должны быть приведены к угловой скорости шкива Кёпе, ибо обычно угловые скорости шкива Кёпе и направляющих шкивов (при одинаковой окружной скорости) различны.

При невозможности точно подсчитать момент инерции шкивов можно ориентировочно базироваться на их весе и наружном радиусе. Масса любого шкива

$$m = \frac{G_1}{g},$$

где G_1 — вес шкива. Радиус инерции ρ приблизительно равен $0,7 R$ (наружного радиуса) для направляющих шкивов и $0,67 R$ для шкивов Кёпе ($J = m \cdot \rho^2$).

Приведение поступательного движения к вращательному может быть сделано по формуле (88). Заметим, что в случае приведения системы к поступательному движению мы должны все массы системы привести к скорости груза или канатов. К этой же скорости должна быть отнесена масса двигателя и масса шкивов направляющих и Кёпе. Если истинный вес шкива Кёпе G_k , радиус инерции его ρ , наружный радиус R_k , то при $\rho = 0,67 R$ истинная масса

$$m_k = \frac{G_k}{g}; \quad J = m_k \rho^2 = \frac{G_k}{g} \cdot (0,67 R_k)^2.$$

Масса же m' , отнесенная к наружному радиусу R , т. е. к окружной скорости шкива Кёпе или скорости клетки согласно равенству (92), будет

$$m' = \frac{m_k \rho^2}{R^2} = \frac{G_k}{g} \cdot \frac{(0,67 R_k)^2}{R^2} = 0,67^2 \cdot \frac{G_k}{g}.$$

Посредством указанных равенств определяются динамические моменты.

Двигатель должен преодолевать сумму статического и динамического момента. Эта сумма представлена особым графиком

$M_m + M_j$ на фиг. 181. В зависимости от соотношения M_m и M_j результирующий момент или момент, развиваемый двигателем во время торможения, может быть как положительным, так и отрицательным, т. е. может лежать как выше оси абсцисс, так и ниже.

Имея график моментов двигателя, т. е. нагрузочную диаграмму последнего, находим эквивалентный момент за один цикл подъема

$$M_g = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{at_1 + t_2 + at_3 + \beta t_4}}$$

Далее двигатель должен быть проверен на перегрузку. Наибольший потребный от двигателя момент будет M_1 в период t_1 . Следовательно, отношение

$$\frac{M_1}{M_g} < \lambda_n,$$

где λ_n — потребная от двигателя перегрузка, принимаемая для подъемных двигателей постоянного и переменного тока за 2. Если отношение $\frac{M_1}{M_g} > 2$, то желательно изменение диаграммы скорости,

что связано с влиянием на производительность шахты и механическое оборудование подъемника.

В противном случае двигатель должен быть выбран по перегрузке так, чтобы $\frac{M_1}{M_N} < 2$. При этом двигатель с точки зрения нагрева оказывается неиспользованным.

Определив M_N , находим

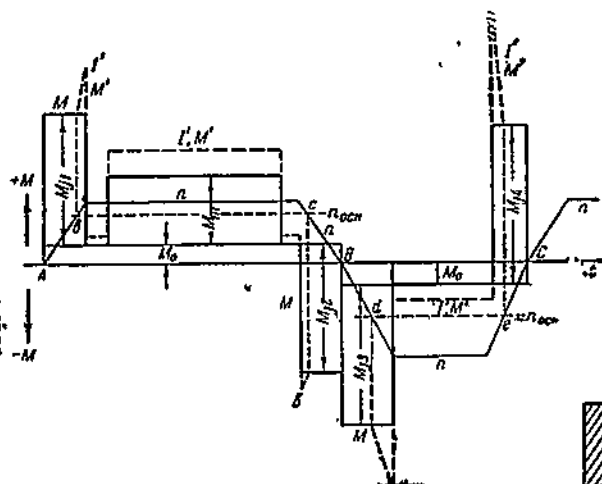
$$P_N = M_N \cdot \omega_N.$$

К этой же категории нагрузочных диаграмм относятся диаграммы строгального станка и реверсивного прокатного стана представленные на фиг. 182 и 183. Нагрузочная диаграмма (скорость, момент, ток) строгального станка разнится от диаграммы уравновешенного шахтного подъемника лишь следующими особенностями:

1. Цикл состоит из прямого и обратного хода. Остановка отсутствует.

2. Статический момент на большей части прямого хода равен статическому моменту резания металла M_m , на меньшей части моменту холостого хода M_0 . Статический момент обратного хода равен M_0 .

3. Скорости прямого и обратного хода не равны. В целях повышения производительности скорость обратного хода больше скорости прямого хода.



Фиг. 182. Нагрузочная диаграмма электропривода строгального станка.

Отметим еще одну особенность этих диаграмм при использовании шунтового двигателя постоянного тока в том случае, когда повышение скорости двигателя на некотором интервале достигается увеличением тока возбуждения согласно равенству

$$n = \frac{U - IR}{c \cdot \Phi}$$

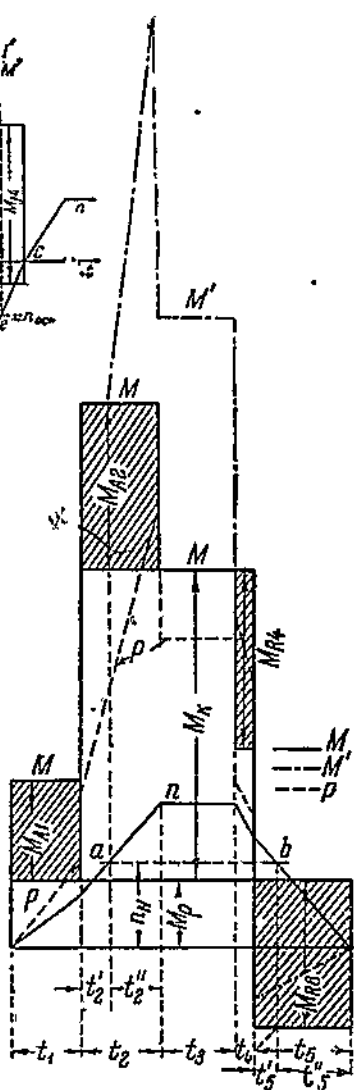
Принципиально этот вопрос был уже освещен в п. 13.

Положим, что от точки *A* до точки *b* (фиг. 182) изменение скорости достигается сопротивлением в цепи якоря. В этом случае $\Phi = \text{const}$ и $M_d = k_2 \cdot I$. Метод эквивалентного тока и момента на этом участке оказываются однозначными. При регулировке скорости током возбуждения (между точками *b* и *c*, *d* и *e*) $M_d = c \cdot \Phi \cdot I = c \cdot \Phi' \cdot I'$.

Уменьшение тока возбуждения при том же потребном от двигателя моменте вызывает увеличение тока якоря в отношении

$$I' = I \cdot \frac{\Phi}{\Phi'} = I \cdot \frac{n'}{n_0},$$

где основная скорость n_0 соответствует максимальному магнитному потоку.



Фиг. 183. Нагрузочная диаграмма реверсивного прокатного стана.

При этом кривая I' получает вид пунктирной кривой фиг. 182. К ней и должен быть применен метод эквивалентного тока. Указанное увеличение тока имеет место и при установившейся скорости, полученной уменьшением тока возбуждения при уменьшении скорости до основной.

Если мы хотим использовать метод эквивалентного момента, а не тока, то для его применения нужно взять не действительную кривую момента $M_d=f(I)$, а кривую так называемого момента с поправкой $M_d'=k_2 I'$, пропорционального главному току на всем диапазоне, включая и участок $\Phi=\text{var}$. При этом

$$M_o = \sqrt{\frac{\sum_0^{t_2} M'^2_x \Delta t_x}{t_2}}$$

Проверку на перегрузку в данном случае необходимо сделать, исходя из предельных значений тока.

Отношение $\frac{I'_{\max}}{I_N}$ должно лежать в допустимых пределах.

Нагрузочная диаграмма реверсивного прокатного стана имеет следующие особенности:

1) цикл состоит из ряда пропусков металла через валки. После каждого пропуска двигатель реверсируется;

2) между реверсами могут иметь место остановки;

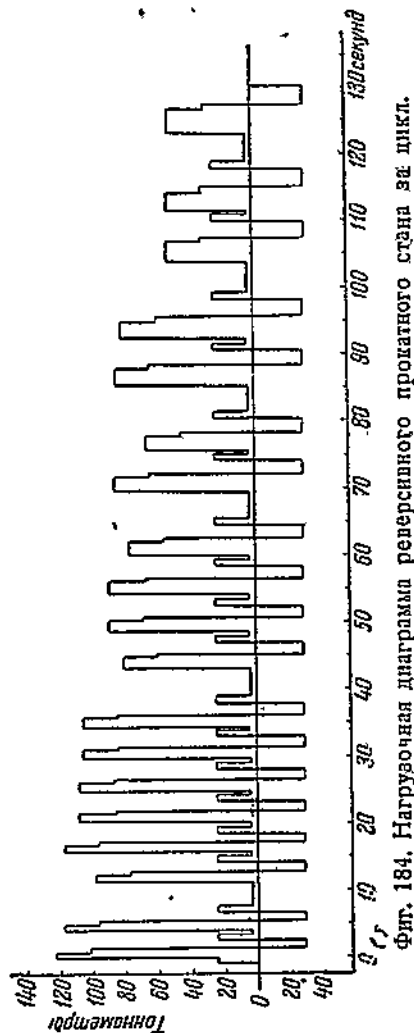
3) длительности отдельных пропусков и отдельных пауз различны;

4) статические моменты прокатки, находимые по работе прокатки металла, по отдельным пропускам также различны;

5) прокатка начинается при скорости, отличной от нуля, и заканчивается при скорости, отличной от нуля;

6) по мере удлинения прокатываемой полосы скорость от пропуска к пропуску повышается;

7) до основной скорости регулировка скорости ведется на протяжении на зажимах двигателя при $\Phi_d = \text{const}$, выше—умень-



Фиг. 184. Нагрузочная диаграмма реверсивного прокатного стана за цикл.

шением тока возбуждения. Потому в кривую момента необходимо внесение поправок. Нагрузочная диаграмма для одного пропуска реверсивного прокатного стана представлена на фиг. 183. Диаграмма моментов без поправки для всего цикла показана на фиг. 184. Метод эквивалентного момента в данном случае должен быть применен ко всему циклу, соответствующему длительности прокатки одного слитка, включая и паузу между двумя соседними слитками.

58. Численный пример расчета мощности двигателя для шахтного подъемника с уравновешенным канатом (шкив Кёпе)

Требуется рассчитать мощность двигателя для шахтного подъемника со шкивом Кёпе. Подъемник приводится в движение двумя непосредственно связанными со шкивом Кёпе двигателями. Производительность подъемника — 256 т в час. Кроме расчета мощности двигателей требуется проверить систему на отсутствие скольжения каната при угле обхвата канатом шкива в 190° и коэффициенте трения в 0,16.

Основные данные для расчета:

1. Глубина шахты $H = 915$ м.
2. Вес полезного груза $G = 6000$ кг.
3. Вес каждой влети $G_{н.к.} = 4875$ кг.
4. Вес вагонеток на келье $G_v = 3000$ кг.
5. Суммарный вес главного и уравновешивающего канатов на погонный метр $G_{кан} = 10,8$ кг.
6. Диаметр шкива Кёпе $D_k = 6,44$ м.
7. Вес шкива Кёпе $G_k = 14930$ кг.
8. Радиус инерции шкива Кёпе $r_k = 0,67$ от наружного.
9. Вес каждого направляющего шкива $G_{н.ш.} = 4840$ кг.
10. Диаметр направляющих шкивов $D_{н.ш.} = 5$ м.
11. Радиус инерции направляющего шкива $r_{н.ш.} = 0,7$ от наружного.
12. Нормальная скорость подъемника $v_n = 16$ м/сек.
13. Ускорение при подъеме $a_1 = 0,89$ м/сек².
14. Замедление при подъеме $a_2 = 1$ м/сек².
15. Длительность цикла $t_z = 89,2$ сек.
16. Трение учитывается увеличением полезного груза на 20%.

Строим сначала диаграмму скорости (фиг. 185). При ускорении $a_1 = 0,89$ м/сек² время ускорения

$$t_1 = \frac{16}{0,89} = 18 \text{ сек.}$$

Путь, пройденный за время ускорения, будет

$$S_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2} = \frac{0,89 \cdot 18^2}{2} = 144,3 \text{ м.}$$

При замедлении $a_2 = 1$ м/сек² время замедления

$$t_2 = \frac{v}{a_2} = \frac{16}{1} = 16 \frac{1}{2} \text{ сек.}$$

Путь, пройденный за время замедления, будет

$$S_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2} = \frac{1 \cdot 16^2}{2} = 128 \text{ м.}$$

Путь, приходящийся на движение при равномерной скорости,

$$S_2 = S - S_1 - S_3 = 915 - 144,3 - 128 = 642,7 \text{ м.}$$

Время движения при нормальной скорости

$$t_3 = \frac{S_2}{v} = \frac{642,7}{16} = 40,2 \text{ сек.}$$

Время разгрузки (погрузки)

$$t_4 = 89,2 - 40,2 - 18 - 16 = 15 \text{ сек.}$$

Выбираем ориентировочно мощности двигателей по нормальной мощности подъема

$$P = \frac{G \cdot 1,2 \cdot v_n}{102} = \frac{6\,000 \cdot 1,2 \cdot 16}{102} = 1\,113 \text{ kW.}$$

Повысим мощность двигателей на 25% для учета динамических моментов. Получаем суммарную мощность двух двигателей примерно в 1400 kW при мощности одного двигателя в 700 kW. Номинальное число оборотов двигателя в минуту

$$n_n = \frac{v_n}{\frac{\pi D}{60}} = \frac{60 \cdot v_n}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 16}{\pi \cdot 6,44} = 47 \text{ об/мин.}$$

Номинальная угловая скорость двигателя

$$\omega_N = \frac{2\pi n_n}{60} = 4,93 \text{ рад/сек.}$$

Маховой момент одного двигателя можно принять в 108 600 kgm², двух двигателей — 217 200 kgm².

Определяем статический момент. Ввиду того, что система в отношении мертвого груза полностью уравновешена, в статическом моменте мы должны принять лишь полезный груз с учетом потерь на трение в 20% от полезного груза. Отнесенный к окружности шкива Кёпе статический момент

$$[M_m = 1,2 \cdot G \cdot R_k = 1,2 \cdot 6\,000 \cdot 3,22 = 23\,200 \text{ kgm.}$$

Для определения динамического момента нужно найти или приведенную массу или приведенный момент инерции всей системы. Найдем сначала приведенный к угловой скорости шкива Кёпе (или двигателей) момент инерции всех вращающихся частей: двигателей шкива Кёпе и направляющих шкивов. Так как двигатели и шкив Кёпе вращаются с одинаковой угловой скоростью, то их моменты инерции можно просто складывать. Угловая скорость направляющих шкивов другая, чем шкива Кёпе, поэтому момент инерции направляющих шкивов должен быть приведен к угловой скорости шкива Кёпе. Приведенный к шкиву Кёпе момент инерции всех вращающихся частей подъемника будет

$$J' = 2 J_{\text{двиг}} + J_k + 2 J_{\text{н. ш}} \left(\frac{\omega_{\text{н. ш}}}{\omega_k} \right)^2;$$

$$2 J_{\text{двиг}} = \frac{217\,200}{4g} = 5\,530 \text{ kgm sec}^2.$$

Масса шкива Кёпе

$$m_k = \frac{G_k}{g} = \frac{14\,930}{9,81} = 1\,552 \text{ kgm}^{-1} \text{ sec}^2.$$

Момент инерции шкива Кёпе

$$J_K = m_K \cdot r_K^2 = 1522 \cdot (0,67 \cdot 3,22)^2 = 7080 \text{ kgm sec}^2.$$

Масса каждого направляющего шкива будет

$$m_{н. ш} \cdot \frac{G}{g} = \frac{4840}{9,81} = 494 \text{ kgm}^{-1} \text{ sec}^2.$$

Момент инерции каждого из направляющих шкивов

$$J_{н. ш} = m_{н. ш} \cdot \rho_{н. ш}^2 = 494 \cdot (0,7 \cdot 2,5)^2 = 1515 \text{ kgm sec}^2.$$

Момент инерции обеих направляющих шкивов, приведенный к угловой скорости двигателя (шкива Кёпе), будет

$$2 J'_{н. ш} = 2 J_{н. ш} \left(\frac{\omega_{н. ш}}{\omega_K} \right)^2;$$

$$\frac{\omega_{н. ш}}{\omega_K} = \frac{R_{н. ш}}{\frac{v}{R_K}} = \frac{1 R_K}{R_{н. ш}} = \frac{3,22}{2,5};$$

$$2 J'_{н. ш} = 2 J_{н. ш} \left(\frac{R_K}{R_{н. ш}} \right)^2 = 3030 \left(\frac{3,25}{2,5} \right)^2 = 5120 \text{ kgm sec}^2.$$

Суммарный приведенный маховой момент вращающихся частей системы будет

$$J = 5530 + 7080 + 5120 = 17730 \text{ kgm sec}^2.$$

Найдем веса частей, движущихся поступательно. Сюда войдут:

- 1) вес полезного груза 6000 kg;
- 2) вес двух клетей 2·4875 kg;
- 3) вес вагонок в обеих клетях 2·3000 kg;
- 4) полный вес каната, равный $10,8 \cdot (9152 + 90) = 20740$ kg, где добавочные 90 m ориентировочно учитывают охват шкивов Кёпе и направляющих.

Масса частей, движущихся поступательно, будет

$$m = \frac{G}{g} = \frac{6000 + 2 \cdot 4875 + 6000 + 20740}{9,81} = \frac{42490}{9,81} = 4330 \text{ kgm}^{-1} \text{ sec}^2.$$

Эквивалентный этой массе момент инерции, приведенный к угловой скорости шкива Кёпе, будет

$$J'' = \frac{mv^2}{\omega^2} = \frac{4330 \cdot 16^2}{4,93^2} = 45500 \text{ kgm sec}^2.$$

Приведенный момент инерции всей системы

$$J = J' + J'' = 17730 + 45500 = 63230 \text{ kgm sec}^2.$$

Динамический момент

$$Mj = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \frac{\omega_n}{t_x}.$$

Так как в данном случае мы принимаем ускорение постоянным, следовательно,

$$\frac{d\omega}{dt} = \text{const} = \frac{\omega_n}{t_x}.$$

Угловое ускорение будет

$$\omega_y = \frac{4,93}{18} = 0,274 \text{ рад/сек}^2.$$

Угловое замедление будет

$$\omega_3 = \frac{4,93}{16} = 0,308 \text{ рад/сек}^2.$$

Динамический момент при ускорении будет

$$M_{Jy} = 63\,230 \cdot 0,274 = 17\,325 \text{ кгм.}$$

Динамический момент при замедлении будет

$$M_{J_3} = 63\,230 \cdot 0,308 = 19,475 \text{ кгм.}$$

Для уяснения некоторых вопросов, весьма существенных для правильного выбора мощности двигателя, остановимся на другом возможном способе подсчета динамического момента и сопоставим их один с другим.

Динамический момент может быть выражен как

$$M_J = J \cdot \frac{\omega_n}{t_x} = J \cdot \frac{R_K}{t_x} \cdot \frac{v_n}{R_K} = J \cdot \frac{v_n}{R_K \cdot t_x}$$

или

$$M_J = F_x \cdot R_x = m_x \cdot a_x \cdot R_x,$$

где F_x , m_x , a_x — сила, приведенная масса и линейное ускорение, отнесенные к радиусу системы R_x .

Подсчет по первому способу был проделан выше. Вычислим M_J по второму способу.

Определим сначала приведенную массу всей системы, пользуясь ее моментом инерции, приведенным к шкиву Кёпе:

$$m_x = \frac{J}{\rho_K^2} = \frac{J}{(0,67 R_K)^2}.$$

Сила F_x , необходимая для ускорения этой массы, будет

$$F_x = m_x \cdot a_x.$$

Поскольку приведенная масса системы m_x отнесена нами к шкиву Кёпе, т. е. его радиусу инерции, то и линейное ускорение a_x мы должны брать для точек шкива Кёпе, лежащих не на его наружной окружности, а на окружности радиуса инерции, т. е.

$$a_x = a_K = a \cdot \frac{\rho_K}{R_K} = \frac{v_n}{t_1} \cdot \frac{\rho_K}{R_K}.$$

Таким образом необходимая для ускорения массы сила

$$F_x = m_x \cdot a \cdot \frac{\rho_K}{R_K} = \frac{J}{(0,67 R_K)^2} \cdot a \cdot \frac{\rho_K}{R_K}.$$

Для нахождения M_J по силе F_x нужно эту силу умножить на плечо, т. е. на некоторый радиус, но не на наружный радиус шкива Кёпе R_K , а на радиус его инерции $\rho_K = 0,67 R_K$, так как мы рассматриваем силу приведенной к радиусу инерции шкива Кёпе, ρ_K т. е.

$$M_J = F_x \cdot \rho_K = \frac{J}{(0,67 R_K)^2} \cdot a \cdot \frac{\rho_K}{R_K} \cdot \rho_K.$$

Только при таком подсчете мы получим по второму способу правильные цифры и одинаковые с цифрами по первому способу, а именно

$$M_I = \frac{J}{(0,67 R_K)^2} \cdot \frac{v_n}{t_1} \cdot \frac{\rho_K^3}{R_K} = J \cdot \frac{v_n}{R_K \cdot t_1}$$

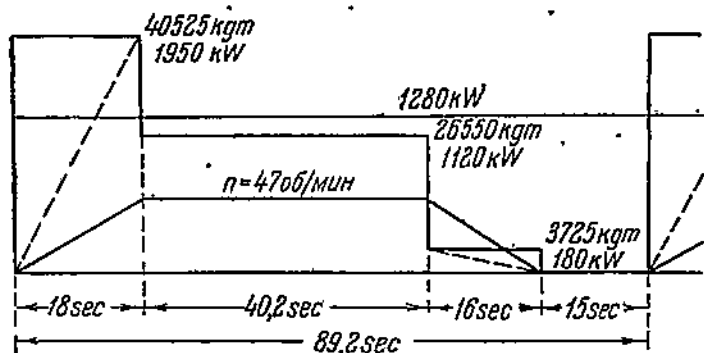
Тот же результат мы получили бы, если бы оперировали с наружным радиусом шкива Кёпе R_K , но отнесли бы приведенную массу системы не к радиусу инерции ρ_K , а к наружному радиусу шкива Кёпе R_K . Приведенная к этому радиусу масса

$$m' = m \cdot \frac{\rho_K^3}{R_K^3};$$

$$F' = m' \cdot a;$$

$$M_I = F' \cdot R_K = m' \cdot a \cdot R_K = m \cdot \frac{\rho_K^3}{R_K^3} \cdot a \cdot R_K = \frac{J}{\rho_K^2} \cdot \frac{\rho_K^2}{R_K^3} \cdot \frac{v_n}{t_1} \cdot R_K = J \cdot \frac{v_n}{R_K \cdot t_1}.$$

Сделанные подсчеты показывают, какую максимальную осторожность нужно соблюдать при приведении движения вращательного к поступательному и обратно, чтобы не допустить ошибки в выборе мощности двигателя.



Фиг. 185. Диаграммы скорости, результирующих моментов и мощности двигателя подъемника со шкивом Кёпе.

Суммарные моменты — статические и динамические и максимальные мощности (фиг. 185) — за различные периоды будут:

$t_1 = 18$ сек;	$M_1 = 40\,525$ кгм;	$P_1 = 1\,950$ кВт
$t_2 = 40,2$ „	$M_2 = 23\,200$ „	$P_2 = 1\,120$ „
$t_3 = 16$ „	$M_3 = 3\,725$ „	$P_3 = 180$ „
$t_4 = 15$ „	$M_4 = 0$ „	$P_4 = 0$ „

Применяя метод эквивалентного момента, находим

$$M_s = \sqrt{\frac{40\,525^2 \cdot 18 + 23\,200^2 \cdot 40,2 + 3\,725^2 \cdot 16}{40,2 + 0,75 \cdot (18 + 16) + 0,5 \cdot 15}} = 26\,550 \text{ кгм.}$$

Согласно п. 13 в знаменателе под корнем время ускорения и замедления умножаем на 0,75, а время паузы — на 0,5. Проверяем двигатель на перегрузку:

$$\frac{M_1}{M_s} = \frac{40\,525}{26\,550} = 1,53 < 2.$$

Номинальная мощность двух двигателей

$$P_D = M_D \cdot \omega_N = 1280 \text{ kW.}$$

Таким образом каждый из двух двигателей должен иметь мощность $P_N = 640 \text{ kW}$ при скорости 47 об/мин.

Для выяснения вопроса со скольжением каната подсчитываем статические усилия на подъемной и спускающейся стороне.

Так как потери ослабляют натяжение спускающего каната, то эквивалентный им вес взят в этом случае со знаком минус.

В добавление к этим статическим силам для ускорения перечисленных грузов и двух направляющих шкивов необходимы усилия, равные произведенной массе на ускорение. Приведенный к поступательному движению вес направляющего шкива будет

Составные части	Вес в kg	
	Подъемная сторона	Спускающаяся сторона
Чистая нагрузка .	+ 6 000	—
Клеть	+ 4 875	+ 4 875
Вагонетки	+ 3 000	+ 3 000
915 м каната	+ 9 875	+ 9 875
Вес, эквивалентный потерям, равный 0,1 G	+ 600	— 600
	24 350	17 150

$$G'_{н. ш} = m'_{н. ш} \cdot g = \frac{J'_{н. ш} \cdot \omega^2_k}{r^2} \cdot g = \frac{2560 \cdot 4,93^2 \cdot 9,81}{16^2} = 2380 \text{ kg.}$$

Один шкив относим к подъемной стороне, другой — к спускающейся. Сила для ускорения масс на подъемной стороне будет

$$F'_1 = m_1 \cdot a = \frac{24350 + 2380}{9,81} \cdot 0,89 = 2420 \text{ kg.}$$

Суммарное усилие на подъемной стороне F_1 будет

$$F_1 = 24350 + 2420 = 26770 \text{ kg.}$$

Сила для ускорения масс на спускающейся стороне будет

$$F'_2 = m_2 \cdot a = \frac{17150 + 2380}{9,81} \cdot 0,89 = 1770 \text{ kg.}$$

Суммарное усилие на спускающейся стороне будет

$$F_2 = 17150 - 1770 = 15380 \text{ kg.}$$

При угле обхвата канатом шкива Кёпе в 230° или 4,02 радиана и коэффициенте трения $\mu = 0,20$

$$e^{\mu \beta} = 2,22.$$

Так как

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{26770}{15380} = 1,74 = 0,78 \cdot e^{\mu \beta},$$

то скольжения каната по шкиву не будет. Коэффициент запаса равен

$$15380 \cdot 2,22 - 26770 = 7370 \text{ kg.}$$

Этим расчет мощности двигателя для шахтного подъемника заканчивается.

59. Механические переходные режимы электроприводов с шунтовой характеристикой при статическом моменте, зависящем от скорости

Исполнительные механизмы со статическим моментом, зависящим от скорости, встречаются в промышленной практике вообще значительно реже, чем с $M_m = \text{const}$. Вместе с тем аналитическое решение задач для этого класса нагрузочных диаграмм оказывается несколько более сложным. Мы ограничимся сравнительно кратким рассмотрением этого класса. Типичнейшими его представителями, как отмечено выше, являются механизмы с вентиляторным моментом $M_m = M_0 + c \cdot n^2$, где M_0 — момент трения в подшипниках (вентиляторы, центрифуги).

Практически целесообразно коснуться лишь двух наиболее характерных подразделений этого класса: 1) случай $M_m = c \cdot n$; 2) случай $M_m = c \cdot n^2$ или $M_m = M_0 + c_1 \cdot n^2$.

Сначала рассмотрим решение задач переходных режимов для случая $M_m = c \cdot n$. С такой зависимостью приходится иметь дело в некоторых текстильных машинах, в которых наряду с постоянными моментами трения в подшипниках имеются силы трения отдельных элементов о воздух, изменяющиеся в квадратичной зависимости от скорости. При этом результирующий момент в ряде случаев может быть принят пропорциональным скорости.

Аналогичные зависимости могут встречаться и в других исполнительных механизмах.

Поскольку в случае электропривода с шунтовой характеристикой момент двигателя изменяется прямолинейно со скоростью ($M_d = \alpha - \beta n$), то при статическом моменте, также прямолинейно зависящем от скорости ($M_m = c \cdot n$), аналогично будет изменяться и динамический момент

$$M = M_d - M_m = \alpha - \beta n - cn = \alpha - \gamma \cdot n.$$

Следовательно, для решения уравнения движения привода может быть в данном случае использован метод, описанный выше в п. 26, как применительно к построению кривой скорости [уравнение (121)], так и применительно к построению кривой пути [уравнение (124)].

Здесь же, как при $M_m = \text{const}$, мы будем рассматривать решение уравнения движения электропривода, используя переменную s (скольжение), а не скорость вращения n . Решение будем производить сразу для разных режимов пуска, торможения, изменения нагрузки в обобщенном виде. Случаи отрицательного (реактивного) статического момента в рассматриваемом здесь нами классе нагрузочных диаграмм практически отпадают.

Обобщенное уравнение движения привода (с учетом сказанного о знаках в п. 51) получит вид для пуска и торможения

$$\pm M_d - M_m = \mp \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt}. \quad (299)$$

При этом $M_d = c_1 \cdot s$.

В свою очередь статический момент можно выразить, как

$$M_m = c' \cdot n = c' \cdot n_0 (1 - s) = c_2 (1 - s). \quad (300)$$

Подставляя в (299), получим

$$\pm c_1 s - c_2 (1 - s) = \pm \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt}.$$

Разделяя переменные, будем иметь

$$\frac{ds}{(c_2 \pm c_1)s - c_2} = \pm \frac{375}{GD^2 n_0} \cdot dt.$$

Интегрируя, получаем

$$\pm \frac{375}{GD^2 \cdot n_0} \cdot t = \frac{1}{c_2 \pm c_1} \ln [(c_2 \pm c_1)s - c_2] + \ln k.$$

Для определения подинтегральной постоянной ($\ln k$) обращаемся к начальным условиям. В зависимости от рассматриваемого режима начальные условия могут быть различны. Вообще же они определяются начальным скольжением $s = s_N$ при $t = 0$. В таком случае

$$\ln k = -\frac{1}{c_2 \pm c_1} \ln [(c_2 \pm c_1) \cdot s_N - c_2], \quad (301)$$

откуда

$$\ln \frac{(c_2 \pm c_1) \cdot s - c_2}{(c_2 \pm c_1) s_N - c_2} = \pm \frac{375(c_2 \pm c_1)}{GD^2 \cdot n_0} \cdot t.$$

Рассмотрим режим пуска. В этом случае будем иметь

$$\ln \frac{(c_2 + c_1) \cdot s - c_2}{(c_2 + c_1) s_N - c_2} = -\frac{375(c_2 + c_1)}{GD^2 \cdot n_0} t = -\frac{1}{B'} t,$$

где B' — электромеханическая постоянная, равная

$$B' = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375(c_2 + c_1)}. \quad (302)$$

Тогда

$$s = \frac{c_2}{c_2 + c_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{B'}} \right) + s_N \cdot e^{-\frac{t}{B'}}. \quad (303)$$

Возьмем частный случай, обычно несколько отличающийся от действительных условий, а именно положим, что статический момент при номинальной скорости равен номинальному моменту двигателя. Найдем при этом значение коэффициентов c_1 и c_2

$$M_N = c_1 \cdot S_N; \quad M_N = c_2 (1 - S_N),$$

откуда

$$c_1 = c_2 \cdot \frac{1 - S_N}{S_N} \quad \text{и} \quad \frac{c_2}{c_2 + c_1} = S_N.$$

При этом

$$B' = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375(c_2 + c_1)} = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot c_2 \left(1 + \frac{1 - s_N}{s_N}\right)} = \frac{GD^2 \cdot n_0 s_N (1 - s_N)}{375 M_N} = B(1 - s_N^2). \quad (304)$$

В таком случае при режиме пуска получим выражение для скольжения

$$s = s_N \left(1 - e^{-\frac{t}{B'}}\right) + s_H \cdot e^{-\frac{t}{B'}}. \quad (305)$$

Аналогично могут быть найдены равенства для моментов и для токов двигателя

$$M_d = M_N \left(1 - e^{-\frac{t}{B'}}\right) + M_H \cdot e^{-\frac{t}{B'}}, \quad (306)$$

$$I_d = I_N \left(1 - e^{-\frac{t}{B'}}\right) + I_H \cdot e^{-\frac{t}{B'}}. \quad (307)$$

Для режима торможения за электромеханическую постоянную B'' необходимо принять выражение

$$B'' = -\frac{GD^2 \cdot n_0}{375(c_2 - c_1)} = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375(c_1 - c_2)}. \quad (308)$$

В таком случае

$$s = \frac{c_2}{c_2 - c_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{B''}}\right) + s_H \cdot e^{-\frac{t}{B''}}. \quad (309)$$

Аналогичным образом могут быть написаны выражения для момента двигателя и тока.

В случае принятого выше условия соответствия моментов двигателя и статического

$$\frac{c_2}{c_2 - c_1} = \frac{s_N}{2s_N - 1}.$$

Стало быть,

$$s = \frac{s_N}{2s_N - 1} \left(1 - e^{-\frac{t}{B''}}\right) + s_H \cdot e^{-\frac{t}{B''}}. \quad (310)$$

При этом

$$\begin{aligned} B'' &= \frac{GD^2 \cdot n_0}{375(c_1 - c_2)} = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot c_2 \left(\frac{1 - s_N}{s_N} - 1\right)} = \\ &= \frac{GD^2 \cdot n_0 \cdot (1 - s_N) \cdot s_N}{375 M_N (1 - 2s_N)} = B \cdot \frac{1 - s_N}{1 - 2s_N}. \end{aligned} \quad (311)$$

Приведенные равенства показывают, что при $M_m = c \cdot n$ характер изменения скольжения (а стало быть, и скорости), момента и тока двигателя остается экспоненциальным.

Однако электромеханическая постоянная здесь уже не имеет вида, полученного нами при $M_m = \text{const}$, а выражается несколько иначе, притом различно для режима пуска (304) и для режима торможения (311).

Таким образом необходимо констатировать, что электромеханическая постоянная при данном маховом моменте системы в общем случае зависит:

- 1) от характера изменения статического момента исполнительного механизма;
- 2) от режима работы электропривода.

Общее выражение этой постоянной и для электропривода с шунтовой характеристикой можно написать лишь в виде

$$B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_N \cdot \alpha, \quad (312)$$

где α — коэффициент, зависящий от указанных выше факторов.

Переходим к рассмотрению работы привода с квадратичной зависимостью статического момента от скорости ($M_m = M_0 + cn^2$). В этом случае уравнение движения с использованием скольжения для случая пуска получит вид

$$c_1 \cdot s - M_0 - c_2 (1-s)^2 = - \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt} \quad (313)$$

или при $M_0 = 0$ будет

$$c_1 \cdot s - c_2 (1-s)^2 = - \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt} \quad (314)$$

Аналитическое решение этого уравнения (или ему аналогичного для режима торможения) вообще возможно. Однако оно довольно громоздко, и практически им пользоваться нецелесообразно. Кривые скольжения, момента, тока здесь уже не имеют чистого экспоненциального характера, а выражаются дробью, в числитель и знаменатель которой входят экспоненты с одной и той же постоянной времени, различной для отдельных режимов. Эта постоянная [Л. 103] имеет еще более сложный вид, чем (304) или (311).

Практически значительно более удобно воспользоваться для этого случая чисто графическим или графо-аналитическим решениями уравнения движения привода, которые вообще проще, достаточно точны и требуют меньше времени для производства расчетов. Поскольку эти методы имеют значение и для многих других ниже рассматриваемых случаев переходных режимов, изложение их мы выделим в особый параграф.

60. Основные методы графического и графо-аналитического интегрирования уравнений движения привода. Принцип пропорций

В электроприводе весьма часто используются различные методы графического или графо-аналитического интегрирования дифференциальных уравнений движения привода. Они применяются или потому, что в некоторых случаях аналитическое решение невозможно или же потому, что в ряде случаев графическое решение, давая достаточную практическую точность, оказывается более простым и удобным, чем аналитическое.

Одним из самых распространенных приближенных методов является метод конечных приращений. Суть этого метода заключается в том, что в уравнениях движения электропривода бесконечно малые изменения числа оборотов в минуту (dn) заменяются малыми конечными значениями (Δn). При этом предполагается, что при подстановке в уравнение движения привода средних значений момента двигателя и статического момента сопротивления для каждого интервала изменения скорости уравнения движения электропривода остаются в силе. Средние значения M_d и M_m обычно находятся графическим путем. Далее могут быть два варианта этого метода.

В первом из них и известным собственно под названием принципа пропорций задаются последовательно значениями Δn_x , графически определяют Δt_x и так постепенно получают всю кривую.

Во втором варианте, известном под названием метода конечных приращений, также задаются последовательно величинами Δn_x . Однако значения Δt_x вычисляются аналитически и уже затем строится соответствующая кривая.

Уравнение движения электропривода применительно к рассматриваемому методу имеет вид

$$M_{dm} - M_{mm} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t}, \quad (315)$$

где M_{dm} и M_{mm} — соответственно средние значения момента двигателя и статического за рассматриваемый участок.

Пропорция получается в виде

$$\frac{M_{dm} - M_{mm}}{\frac{GD^2}{375}} = \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{M_{jm}}{\frac{GD^2}{375}} \quad (316)$$

или иначе

$$\frac{M_{dm} - M_{mm}}{J} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

Для графического пользования приведенной пропорцией все входящие в нее величины должны представляться в соответст-

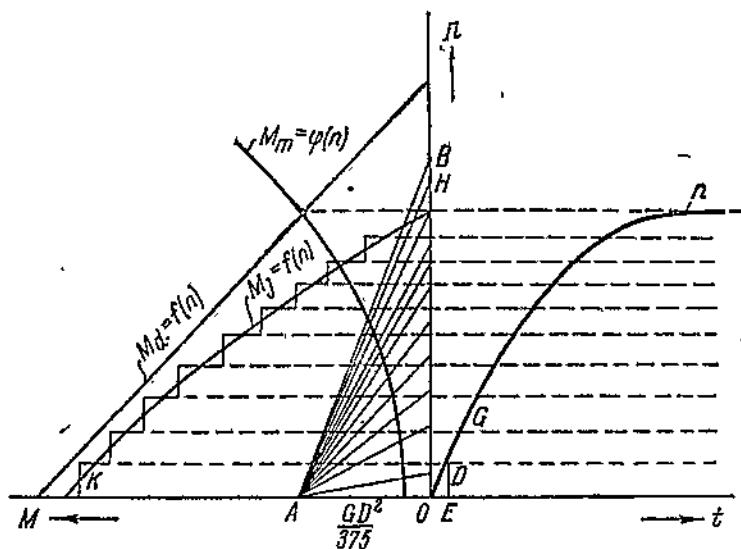
ющем масштабе. Практически выбирают удобный масштаб для n , t и M , а масштаб для J (или $\frac{GD^2}{375}$) находится уже вычислением из пропорции (316).

Очевидно, что

$$\mu_{MM} = \frac{\mu_n \cdot \mu_t}{\mu_n}, \quad (317)$$

где μ_n , μ_{MM} , μ_n , μ_t — масштабы вращающего момента, махового момента, числа оборотов в минуту и времени в 1 мм или 1 см.

Рассмотрим чисто графическое решение задачи, причем в целях уяснения методики сначала для более простого случая, а именно для случая пуска электропривода вентилятора при постоянном сопротивлении в цепи якоря двигателя.



Фиг. 186. Применение принципа пропорций.

Построение будем вести в двух квадрантах. В левом квадранте нанесем $M_d = f(n)$ и $M_m = \varphi(n)$. В правом будем получать кривую $n = \psi(t)$ (фиг. 186).

Для пользования пропорцией (316) вычтем графически из механической характеристики двигателя M_d кривую M_m . Получаем кривую M_j , которая также показана на фиг. 186. Очевидно, что ускорение двигателя происходит до скорости n , при которой $M_d = M_m$ и $M_j = 0$. Кривую M_j делим на участки, на каждом из которых принято $M_j = \text{const}$. Деление должно быть произведено так, чтобы ступенчатая заменяющая кривая была по площади равновелика плавной кривой динамического момента.

Далее поступаем следующим образом. Влево от точки O откладываем в указанном выше масштабе $\frac{GD^2}{375}$ (величина OA). От точки O вверх откладываем ординату OB , равную величине динамического момента OK для первого участка. Соединяем точку A с B . Через точку O проводим прямую $OD \parallel AB$. Линия OD характеризует закон изменения скорости вращения от времени для первого участка при данном $M_{j1} = OB$, соответствующем времени $\Delta t_1 = OE$. Этот закон сохраняется до тех пор, пока не будет достигнута конечная скорость первого участка $\Delta n_1 = DE$. В самом деле, из подобия треугольников ABO и ODE находим

$$\frac{OB}{OA} = \frac{DE}{OE},$$

где $OB = M_{j1}$, $OA = \frac{GD^2}{375}$; $OE = \Delta t_1$. Следовательно, $DE = \Delta n_1$.

Аналогично производится построение для второго участка. По оси ординат откладывается значение $M_{j2} = OH$ для второго участка. Через точку D проводится линия $DG \parallel OH$ до пересечения с горизонталью, определяющей конечное значение скорости n_2 для второго участка. Линия DG представляет закон изменения скорости для второго участка. Так же ведутся все последующие построения.

Кривая $n = f(t)$ складывается из отдельных небольших отрезков прямых. Число их должно быть таково, чтобы можно было построить плавную кривую $n = f(t)$. Очевидно, что чрезмерное увеличение числа участков может повести к неточностям за счет многочисленных графических построений. Ниже будет рассмотрено применение этого метода к пуску центрифуги.

Решение можно провести также графо-аналитическим методом.

Имея кривые M_d и $M_m = f(n)$, вычитаем одну из другой графически и находим $M_j = \varphi(n)$. Далее, задаваясь последовательными приращениями $\Delta n_1, \Delta n_2, \dots, \Delta n_r$, находим средние значения момента для каждого участка $M_{j1}, M_{j2}, \dots, M_{jr}$. Полученные значения подставляем в равенство (316).

Находим Δt_x

$$\Delta t_x = \frac{GD^2}{375} \frac{\Delta n_x}{M_{jx}}. \quad (318)$$

Все вычисления могут быть представлены в следующей таблице.

Таблица XI

Применение графо-аналитического метода

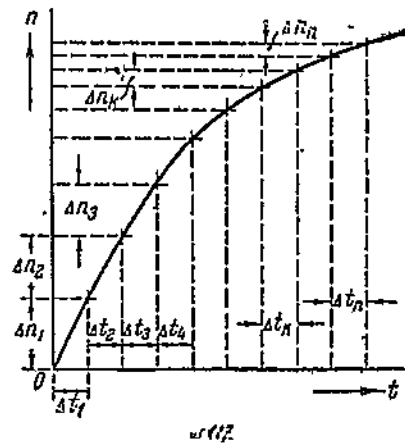
№ по пор.	Начальное значение M_{jk}	Конечное значение M_{jk}	Среднее значение M_{jm}	Приращение скорости вращения за участок	Конечная скорость участка n	Длительность участка	Суммарное время t
1	M'_{j1}	M''_{j1}	M_{jm1}	Δn_1	$n_1 = \Delta n_1$	Δt_1	$t_1 = \Delta t_1$
2	M'_{j2}	M''_{j2}	M_{jm2}	Δn_2	$n_2 = n_1 + \Delta n_2$	Δt_2	$t_2 = t_1 + \Delta t_2$
3	M'_{j3}	M''_{j3}	M_{jm3}	Δn_3	$n_3 = n_2 + \Delta n_3$	Δt_3	$t_3 = t_2 + \Delta t_3$
4	M'_{j4}	M''_{j4}	M_{jm4}	Δn_4	$n_4 = n_3 + \Delta n_4$	Δt_4	$t_4 = t_3 + \Delta t_4$
5	M'_{j5}	M''_{j5}	M_{jm5}	Δn_5	$n_5 = n_4 + \Delta n_5$	Δt_5	$t_5 = t_4 + \Delta t_5$

Откладывая последовательно значения Δn_k для Δt_k (фиг. 187), можно также построить кривую $n = f(t)$.

Так как зависимость между M_d и n нам известна, то, имея кривую $n = f(t)$, легко построить кривую $M_d = f(t)$. В шунтовой машине последняя кривая явится одновременно в некотором масштабе и кривой

$$I_d = \varphi(t).$$

Нами приведено выше рассмотрение принципа пропорций лишь для случая пуска. Построение для случая торможения совершенно аналогично. Нужно только иметь в виду, что для получения динамического момента при торможении тормозной момент двигателя нужно складывать со статическим моментом в случае потенциального момента и положительного реактивного момента. При этом

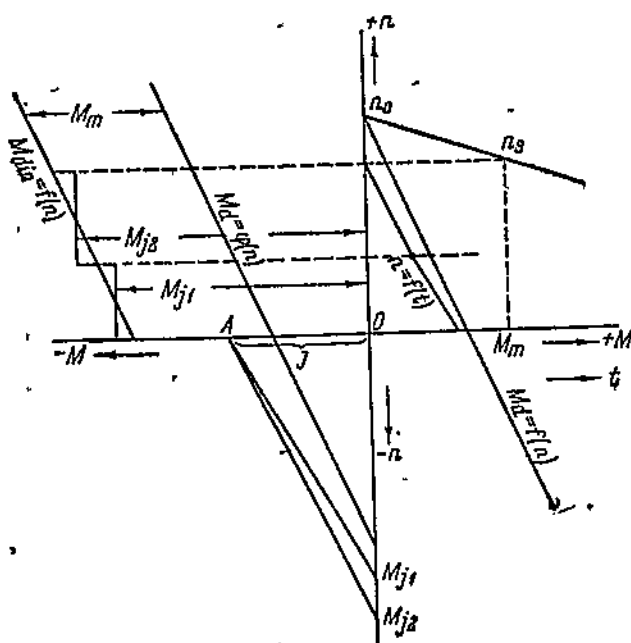


Фиг. 187. Построение кривой $n = f(t)$ по графо-аналитическому методу.

$$\frac{M_j}{GD^2} = \frac{M_{dm} + M_{mm}}{GD^2} = \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (319)$$

Скорость при торможении, очевидно, будет уменьшаться. Так как сумма $(M_{dm} + M_{mm})$ отрицательна, то ее нужно откладывать не вверх, а вниз от начала координат по оси ординат. Треугольник левого квадранта будет направлен вниз. Вниз пойдут и линии скорости. Построение графически выполнено на фиг. 188.

Так как динамический момент в случае фиг. 188 изменяется прямолинейно, то определение кривой $n=f(t)$ может быть выполнено по формуле, аналогичной (121) п. 26.



Фиг. 188. Применение принципа пропорций для торможения.

В тех электроприводах, где приходится иметь дело с реактивным отрицательным моментом, тормозной момент двигателя должен из него вычитаться. Закон изменения скорости в этом случае будет определяться тем, какой момент преобладает.

Как уже отмечалось выше (п. 25), анализ работы электроприводов ряда исполнительных механизмов требует построения кривой пути, проходимого тем или иным рабочим органом. Рассмотрим здесь же попутно применение принципа пропорций для построения кривой пути. Пройденный органом механизма путь будем характеризовать числом оборотов двигателя.

Угловой путь за элемент времени dt

$$d\alpha = \omega \cdot dt.$$

Написанное равенство имеет всего лишь три члена. Поэтому для получения пропорции необходимо в него добавить четвертый член.

Найдем при этом пропорцию для малых конечных пропорций в виде

$$\frac{\Delta \alpha}{\Delta t} = \frac{\omega}{R}, \quad (320)$$

где R — вообще некоторая произвольная величина.

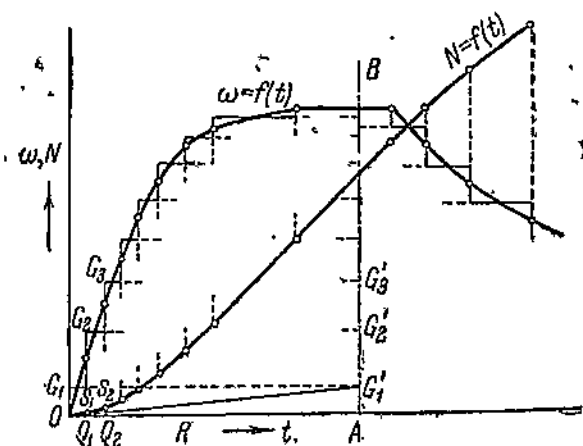
Для графического соблюдения пропорции (320) необходим соответствующий выбор масштабов. Задаваясь масштабами для скорости (μ_ω) и времени (μ_t), мы при выбранном значении R получаем вполне определенное значение масштаба для α .

Так как

$$\frac{\frac{\alpha}{\mu_\alpha}}{\frac{t}{\mu_t}} = \frac{\frac{\omega}{\mu_\omega}}{R}, \quad \text{то } \mu_\alpha = \mu_t \cdot \mu_\omega \cdot R. \quad (321)$$

Очевидно, что введение R эквивалентно увеличению масштаба для α по сравнению с ω в R раз. Практически это оказывается как раз удобным, так как иначе кривая $\alpha = f(t)$ не уместилась бы в пределах того чертежа, который представляет кривую $\omega = \varphi(t)$.

Построение кривой пути по принципу пропорций показано на фиг. 189. На ней приведена кривая $\omega = f(t)$. Построение этой кривой рассмотрено было выше и на фигуре уже не показано. Величина R отложена на оси абсцисс в соответствии с равенством (321). Вообще она может быть произвольной. В данном



Фиг. 189. Применение принципа пропорций для построения кривой пути.

случае $R = OA$. Через точку A проведена пунктиром вертикаль. Плавная кривая скорости заменена эквивалентной ступенчатой кривой. Путь за первый участок, соответствующий времени Δt_1 , находится следующим образом. Через значение скорости OG_1 , соответствующее первому участку, проводится горизонталь до точки G_1' пересечения с вертикалью AB . Точка O соединяется с точкой G_1' прямой. Из точки S_1 на ось абсцисс опускается перпендикуляр. Ордината S_1Q_1 определяет путь, пройденный за пер-

вый участок. В самом деле, из подобия треугольников OAG'_1 и OQ_1S_1 находим

$$\frac{AG'_1}{OA} = \frac{Q_1S_1}{OQ_1}.$$

Так как в соответствующих масштабах $AG'_1 = \omega$, $OA = R$, $OQ_1 = \Delta t_1$, то величина O_1S_1 дает путь, пройденный за первый участок. Все дальнейшее построение аналогично и понятно из чертежа. Очевидно, что при произвольном выборе величины R численное ее значение может быть найдено по величине пути, пройденного за первый участок.

При замене плавной кривой скорости ступенчатой величина пути за каждый участок может быть вычислена также и банальными. Очевидно, что путь в оборотах, за x -ый участок

$$\Delta N_x = \frac{n_{x-1} + n_x}{2} \cdot \Delta t_x,$$

где n_{x-1} и n_x — соответственно скорости вращения привода в начале и конце участка.

В заключение отметим, что при статическом моменте, зависящем от скорости или пути, решение задач о механических переходных режимах практически всегда производится одним из способов, рассмотренных в данном параграфе.

61. Расчет продолжительности пуска шунтового двигателя под пусковым реостатом на примере центрифуги

Приведем пример расчета продолжительности пуска шунтового двигателя под пусковым реостатом при приводе центрифуги, причем предположим, что пусковой реостат имеет семь секций сопротивлений. Такое большое количество секций принято для получения плавного разгона и большего среднего значения динамического момента.

Центрифуги служат для выделения жидкости из твердых тел и обладают большими маховыми массами. Таковы центрифуги, применяемые в химической промышленности для выделения аммонисульфата, в сахарной промышленности — для выделения сиропа из сахарной массы, для рафинировки сырого сахара, в металлообрабатывающей — для отделения масла от стружки, в текстильной — для выделения влаги из пряжи.

Данные рассматриваемой центрифуги: диаметр барабана $D = 2\text{ м}$. Диаметр инерции барабана равен 0,8 наружного диаметра. Вес барабана — 3 т. Номинальное число 500 мин. Маховой момент равен 200 кгм^2 .

Характеристика статического момента центрифуги: пусковой момент (трение покоя) — 12 кгм. Статический момент при скорости, близкой к нулю, — 2 кгм. Статический момент при номинальной скорости 500 об/мин

$$M_{m, 500} = 11,6 \text{ кгм}^2$$

Момент центрифуги зависит от скорости и изменяется по закону

$$M_m = M_0 + cn^2 = 2 + (11,6 - 2) \left(\frac{n}{500} \right)^2$$

Если выбрать двигатель по нормальной статической мощности при $n = 500$ об/мин, то получим мощность двигателя

$$P = M_m \omega = 11,6 \cdot \frac{2\pi \cdot 500}{60} \cdot \frac{1}{102} \approx 6 \text{ kW.}$$

Если бы мы в таких центрифугах выбирали двигатель по вычисленной нормальной статической мощности, то разгон центрифуги длился бы весьма долго, и возможно, что двигатель даже бы и не развернулся.

Для уменьшения продолжительности пуска принимаем двигатель мощностью в 14 kW, 500 об/мин, $GD^2 = 4 \text{ kgm}^2$. Как видно, маховой момент якоря двигателя

по сравнению с маховым моментом центрифуги не играет никакой роли. На фиг. 190 представлены механические характеристики принятого шунтового двигателя при различных сопротивлениях в цепи якоря. По причине постепенного повышения статического момента со скоростью и в целях получения плавного разгона пикн тока выбраны постепенно повышающимися.

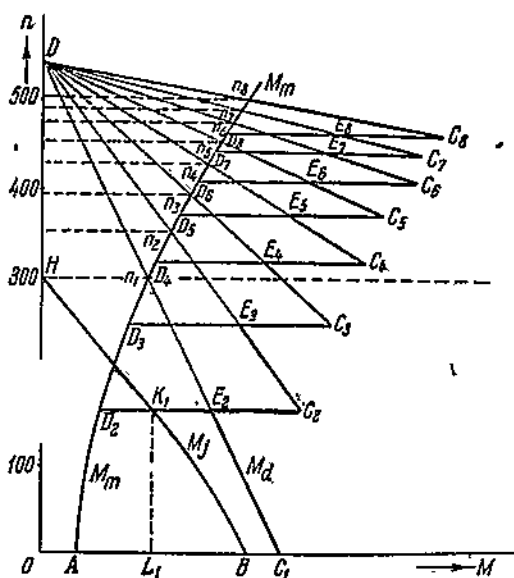
Точка D соответствует n_0 — числу оборотов в минуту идеального холостого хода. Из точки D пучком выходят естественная и искусственные скоростные характеристики

$$M_d = f(n), [DC_1, DC_2, DC_3 \text{ и т.д.}]$$

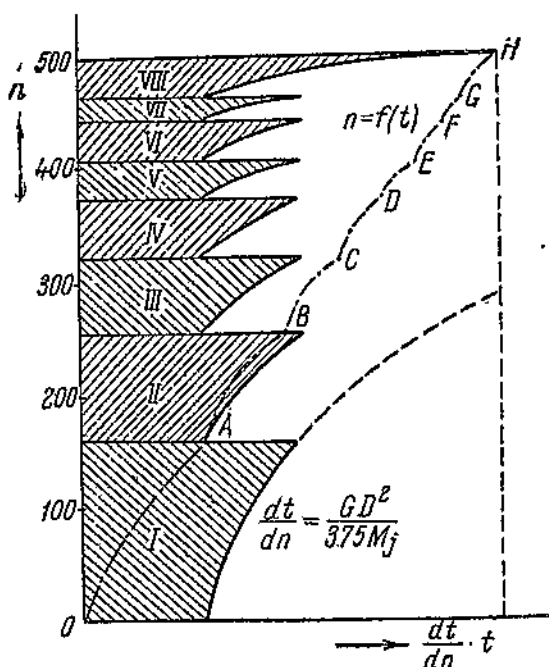
Там же нанесена для центрифуги зависимость $M_m = f(n)$. Она пересекается с механическими характеристиками в точках D_2, D_3, D_4, D_5 и т. д.

Разгон двигателя происходит по частям механических характеристик, очерченных жирными линиями. Переход с одной характеристики на другую происходит по горизонтали (например, от E_2 до C_2 , от E_3 до C_3 и т. д.). Динамический момент электропривода, полученный вычитанием статического момента из момента двигателя, показан отдельно лишь для первой ступени сопротивления. Он представляется кривой BH , однако по достижении точки K_1 двигатель переходит на другую механическую характеристику, на ином, измененном динамическом моменте. Динамические моменты для всех характеристик представляются отрезками (по оси абсцисс) между кривой M_m и линиями C_1D_4, C_2D_5, C_3D_6 и т. д. Отдельно эти динамические моменты, чтобы не затемнять фиг. 190, не показаны.

Для нахождения кривой $n=f(t)$ каждый отрезок динамического момента для той или иной механической характеристики заменяется рядом равнопелликих прямоугольников. Далее можно пользоваться или принципом пропорций или построением кривых $\frac{dt}{dn}$. На фиг. 191 показано использование последнего



Фиг. 190. Характеристики шунтового двигателя для привода центрифуги.



Фиг. 191. Построение кривой $n = f(t)$ для центрифуги.

Заштрихованные площади на фиг. 191 в некотором масштабе представляют времена отдельных периодов пуска, так как

$$t = \int_{n_1}^{n_2} \frac{GD^2}{375 \cdot Mj} dn.$$

Планиметрирование площадей дает возможность найти кривую $n = f(t)$.

На фиг. 191 масштаб по оси ординат для числа оборотов в минуту выбран равным $4,68 \text{ об/мин} = 0,078 \text{ об/сек}$ в 1 мм. Значения $\frac{dt}{dn}$ отложены по оси абсцисс в масштабе $1 \text{ мм} = 7,5 \text{ сек}^2/\text{об}$. Сумма заштрихованных площадей равна 2530 мм^2 . Масштаб времени для 1 мм^2 площадок равен $7,5 \text{ сек}^2/\text{об} \times 0,078 \text{ об/сек} = 0,585 \text{ сек}$. Общее время пуска получается равным $0,585 \cdot 2530 = 1482 \text{ сек} = 24,7 \text{ мин}$.

62. Переходные режимы и нагрузочные диаграммы электропривода с шунтовой характеристикой при статическом моменте, зависящем от пути

Число исполнительных механизмов, в которых статический момент зависит от пути, весьма велико. В большинстве случаев это механизмы с кривошипной передачей, а следовательно, механизмы с переменным приведенным моментом инерции. Рассматривая электроприводы с шунтовой характеристикой, мы будем касаться лишь случая постоянного момента инерции, относя анализ вариантов с переменным маховым моментом к дальнейшему. Практически такое упрощение может быть сделано тогда, когда изменение махового момента исполнительного механизма играет малую роль по сравнению с суммарным маховым моментом электропривода и, в частности, электродвигателя.

Многочисленные примеры исполнительных механизмов, в которых статический момент зависит от пути, были приведены выше. Многие из этих механизмов оказываются целесообразнее приводить серийными двигателями. Здесь мы коснемся лишь таких механизмов, для которых подходит шунтовая характеристика.

Решение уравнения движения электропривода для этого класса диаграмм представляет известные трудности. С одной стороны,

зависимость $M_m = f(L)$ часто может быть представлена лишь графически. С другой стороны, выражение $M_m = f(L)$ получает иногда такую форму, что аналитическое решение уравнения движения привода оказывается или невозможным или довольно громоздким. По этим причинам для решения задач о нагрузочных диаграммах переходных режимов рассматриваемого класса электропривода чаще всего используют графический или графо-аналитический методы решения, описанные выше.

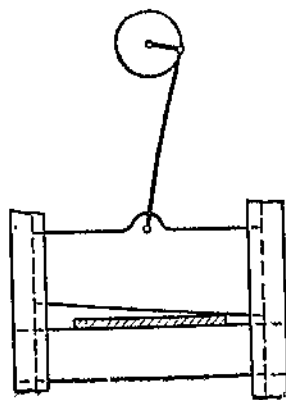
В качестве типичного примера рассмотрим ножницы небольшой мощности для резки железа, причем, как указано выше, маховым моментом самих ножниц пренебрегаем.

Упрощенная кинематическая схема такой рабочей машины представлена на фиг. 192. Ножницы приводятся от двигателя через ряд зубчатых передач посредством кривошипного механизма. Резание железа происходит лишь при движении ножа вниз, т. е. в течение полуоборота кривошипа. Следовательно, полезная статическая нагрузка (резание) имеется на двигателе лишь в течение половины одного цикла. Цикл соответствует одному полному обороту кривошипа.

Наиболее распространенный привод таких ножниц выполняется пока с маховиком. В последние годы в промышленности начинает находить широкое применение привод ножниц с автоматическим управлением двигателем без маховика с остановкой двигателя после каждого реза. Подобный вариант мы рассмотрим далее применительно к используемому в таких случаях серийному двигателю.

Определим сначала требуемое от двигателя статическое усилие или статический момент. Последние две величины связаны между собой постоянным коэффициентом — радиусом кривошипа. Напомним еще раз, что при непрерывно меняющейся нагрузке рабочей машины, что имеет место в работе ножниц, потребный для машины вращающий момент вообще не соответствует моменту двигателя в каждый элемент времени, т. е. $M_m \neq M_d$, вследствие работы маховых масс. Наша задача будет заключаться в том, чтобы, пользуясь кривой $M_m = f(L)$, найти кривую $M_d = f(t)$, необходимую для определения эквивалентного момента двигателя.

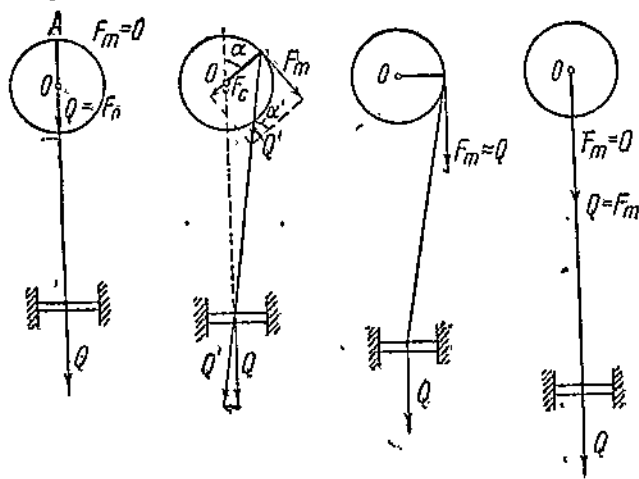
Усилие, которое прикладывается к ножу в течение всего периода резания, т. е. полуоборота кривошипа, если не считать весьма кратковременного начального момента вхождения ножа в металл, остается постоянным и равным $Q = q \cdot s$. (фиг. 193), где



Фиг. 192. Упрощенная кинематическая схема ножниц для резки железа с непрерывной работой.

s — разрезаемое в единицу времени сечение, а q — сопротивление железа резанию.

Вследствие связи двигателя с ножом посредством кривошипной передачи двигатель должен преодолевать статическое усилие F_m , равное тангенциальному усилию на окружности кривошипа.

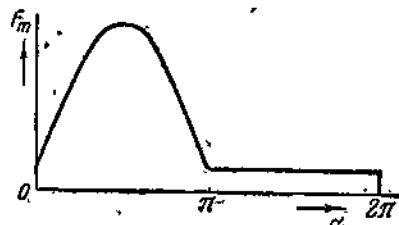


Фиг. 193. Упрощенное определение касательных усилий для ножиц.

Для определения F_m примем длину шатуна бесконечно большой. В таком случае тангенциальное усилие, как ясно из фиг. 193, определится, как

$$F_m = Q \cdot \sin \alpha' \approx Q \cdot \sin \alpha,$$

где α — угловой путь кривошипа от верхнего положения. Усилие F_m достигает максимума тогда, когда кривошип, спускаясь вниз, займет горизонтальное положение. Это усилие становится равным нулю в нижнем положении кривошипа.



Фиг. 194. Зависимость касательных усилий от угла поворота кривошипа для ножиц.

В течение второй половины цикла, т. е. движения кривошипа вверх, статическое усилие, требуемое ножницами, равно лишь усилию для подъема всего электропривода вхолостую.

Зависимость тангенциального усилия от угла α для ножиц этого типа за весь цикл, т. е. при изменении α от 0° до 2π , представлена на фиг. 194.

Максимальное значение усилия, равное усилию на ноже, может быть получено следующим образом.

Положим, что нож имеет наклон 1:10. Для резки дано железо шириной 3500 мм и толщиной 40 мм при часовой производительности 150 резов в час, т. е. число оборотов кривошипа в минуту при этом $150:60=2,5$. Высота подъема ножа при этом будет равна $(3500:10) \cdot 40=390$ мм. Для большей надежности высоту подъема ножа следует взять несколько больше, например 400 мм. Разрезаемое в единицу времени сечение будет $(400 \cdot 40):2=8000$ мм². Принимая сопротивление железа резанию в 50 кг/мм^2 , получим общее усилие в $8000 \cdot 50=400000$ кг. Эта цифра дает возможность построить кривую тангенциальных усилий, приведенных на фиг. 194.

Статический момент на окружности кривошипа будет

$$M_m=400000 \cdot \sin \alpha \cdot R,$$

где R — радиус кривошипа.

Таким образом требуемый в данном случае рабочей машиной от двигателя вращающий момент есть функция пути — углового перемещения кривошипа. Полученный закон M_m одним общим уравнением представлен быть не может. Для аналитического решения пришлось бы разбить кривую на два участка: 1) $M_m = M_0 + c \cdot \sin \alpha$ и 2) $M_m = \text{const}$. Решение для второго участка могло бы быть аналитическим. Оно нами было рассмотрено выше. Остановимся на решении его для первого участка.

Так как для машины с шунтовой характеристикой $M_d = c(\omega_0 - \omega)$, то уравнение движения принимает вид

$$c(\omega_0 - \omega) - c'' \cdot \sin \alpha = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Угловая скорость двигателя ω является функцией угла поворота кривошипа α и равна

$$\omega = k \cdot \frac{d\alpha}{dt},$$

где k — передаточное число от двигателя к кривошипу.

Отсюда находим, что

$$\alpha = \frac{1}{k} \int \omega dt.$$

Уравнение привода получает вид

$$c(\omega_0 - \omega) - c'' \sin \left(\frac{1}{k} \int \omega dt \right) = J \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

Аналитическое решение этого уравнения представляет некоторые трудности, почему и приходится прибегнуть к графическому решению.

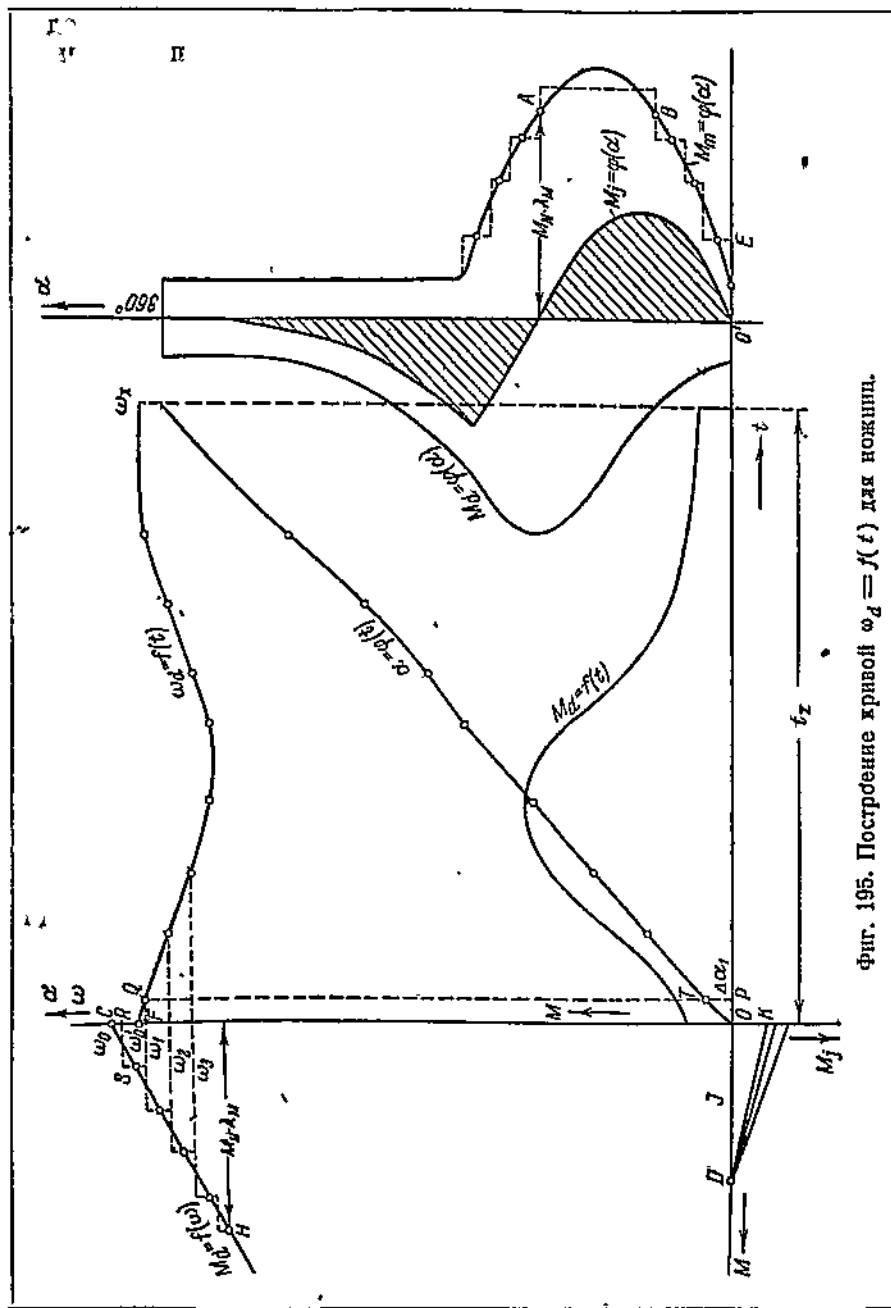
Графическое интегрирование должно вестись методом последовательных приближений. Поскольку здесь $M_m = f(a)$, то параллельно с построением кривой угловой скорости двигателя необходимо строить и кривую пути. Построение этой кривой с помощью принципа пропорций было дано выше (п. 60) и вновь его мы здесь детально не рассматриваем.

Обратимся теперь к построению зависимостей $\omega_a = f(t)$ и $\alpha = \varphi(t)$ для случая ножниц. Для этого в левой части фиг. 195 наносим механическую характеристику двигателя $M_d = f(\omega)$. Предельной рабочей точкой этой характеристики может быть точка $M_N \cdot \lambda_m$, так как свыше перегрузочного момента двигатель нагружаться не должен. В правой части фиг. 195 наносим кривую $M_m = \varphi(a)$. Среднюю часть оставляем для построения $\omega = f(t)$, $M_d = \varphi(t)$ и $\alpha = \psi(t)$. Кривую $M_d = f(\omega)$ заменяем ступенчатой кривой с постоянным значением момента на отдельных участках. То же самое делаем и для кривой M_m . Нужно отметить, что связи во времени между кривой M_d и кривой M_m мы пока не имеем. Поэтому производимое нами деление неизбежно отличается некоторой случайностью, которая затем должна быть выправлена. В качестве ориентировочной связи этих кривых пока может быть использовано следующее обстоятельство. Момент двигателя при пиковой нагрузке сначала увеличивается, а затем начинает спадать. Совершенно очевидно, что момент двигателя достигает наибольшего значения в точке A (а не B) кривой статического момента. Здесь статический момент полностью покрывается двигателем. Если бы двигатель покрывал статический момент полностью в точке B , то при дальнейшем увеличении нагрузки (от B до максимума статического момента) момент двигателя продолжал бы возрастать и двигатель нагрузился бы выше $M_N \cdot \lambda_m$. Это обстоятельство и может быть в начале использовано для деления. Механическую характеристику от точки C до H делим на пять частей. На такое же число делим и кривую $M_m = f(a)$. Использование принципа пропорций ведем по уравнению

$$\frac{M_{Jz}}{J} = \frac{M_{dmx} - M_{m mx}}{J} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}.$$

С этой целью в левой части фиг. 195, по оси абсцисс, откладываем момент инерции электропривода J , приведенный к валу двигателя. Средний маховой момент ножниц может быть вычислен по их геометрическим размерам, маховой же момент двигателя должен быть взят по каталожным данным. J в соответствующем масштабе равняется OD .

Дальнейшее построение ведется способом, обычно принимаемым в принципе пропорций. Берем первый участок кривых (фиг. 195) левой и правой части. В нем $M_{d m1} = SR$; $M_{m m1} = O'E$. Разность $(M_{d m1} - M_{m m1}) = SR - O'E = OK$, как отрицательную, откладываем вниз от точки O по оси ординат. Наклон прямой DK оп-



Фиг. 195. Построение кривой $\omega_D = f(t)$ для ножиц.

ределяет характер изменения скорости за период от $\omega'_0 = OF$, соответствующей моменту холостого хода M_0 , до скорости ω_1 , соответствующей QR .

Однако деление кривой $M_m = f(\alpha)$ нами было произведено случайно. По существу для получения правильных результатов мы должны брать среднее значение статического момента, учитывая пройденный за это время путь. Если в начале первого участка $M_m = M_{m1}$, а в конце его $M_m = M'_{m1}$, то для расчета нужно брать $\frac{M_{m1} + M'_{m1}}{2}$. Поэтому, находя $\Delta\omega_1$ за первый участок и определив

для него далее $\Delta\alpha_1 = PT$, мы можем найти новое среднее значение статического момента за первый участок, т. е. тем самым внести коррективы в произведенное вначале деление кривой M_m . Далее построение для первого участка нужно проделать вновь. Практически это второе построение дает обычно уже приемлемые результаты. Аналогичные коррективы в расчетное значение M_m должны вноситься для всех последующих участков.

Далее берем разность $(M_{md1} - M_{md2})$, откладываем ее и находим характер изменения ω в промежутке от ω_1 до ω_2 и т. д. Таким образом находим всю кривую $\omega = f(t)$ и кривую $\alpha = \psi(t)$ для принятого нами предварительно веса маховика.

На фиг. 195 кроме того построена кривая $M_d = f(t)$, находямая легко, ибо известны зависимости $M_d = f(\omega)$ и $\omega = f(t)$. Далее при известной зависимости $\alpha = \psi(t)$ построена кривая $M_d = \varphi(\alpha)$ и найдена кривая динамического момента $M_f = \varphi(\alpha)$.

Из фиг. 195 видно, что вначале динамический момент имеет отрицательное значение и откладывается вправо от оси ординат, затем динамический момент становится положительным и откладывается уже влево вверх. В соответствии с этим меняется и характер изменения скорости, которая сначала падает, а потом при спадении момента нагрузки постепенно повышается до начальной исходной величины.

Как и во всех других случаях при применении метода эквивалентного тока, построение кривой $\omega = f(t)$ достаточно провести всего лишь за один цикл, т. е. за время изменения α от 0 до 2π . Конечная полученная нами скорость ω_x должна равняться исходной ω'_0 . Отсутствие совпадения ω_x и ω'_0 укажет на то, что за один цикл работы ножиц режим работы двигателя не устанавливается. В этом случае построение нужно продолжать до тех пор, пока исходная скорость в начале цикла не совпадет с конечной скоростью в конце цикла.

Если по мере перехода от одного цикла к другому скорость все время будет снижаться, то это будет свидетельствовать о недостаточной мощности двигателя при данном весе маховика. Продолжая в таком случае построение, мы подошли бы к опрокидывающему моменту, после чего получили бы остановку двигателя.

Кривая $M_d = f(t)$ дает нам возможность определить эквивалентный момент

$$M_d = \sqrt{\frac{\sum_0^{t_z} M_d^2 \Delta t_x}{t_z}}$$

Если полученная нами мощность двигателя P_d не совпадает с выбранной при построении, то кривые необходимо перестроить вновь до совпадения, взяв новые J , M_N и s_N .

Решение уравнения движения привода по указанному способу или какому-либо иному требует предварительного знания параметров двигателя: его механической характеристики, т. е. номинального момента M_N и скольжения s_N , и приведенного махового момента.

Таким образом, как и в других случаях, приходится предварительно задаваться габаритом двигателя и дальше производить проверку его пригодности при выбранном весе маховика. При этом необходимо учитывать, что повышение маховых масс системы уменьшает номинальный момент двигателя и обратно.

Несколько иной метод построения предложен проф. Т. П. Губенко [Л. 104]. Он исходит из тех соображений, что кривая изменения пути в функции от времени при скольжениях, не превышающих 20%, мало отклоняется от прямой. В таком случае $a = c \cdot t$. При этом кривая $M_m = f(a)$ просто может быть заменена кривой $M_m = \varphi(t)$; 360° угла поворота кривошипа по оси абсцисс должны соответствовать длительности цикла t_z при совершенно равномерных масштабах t и a . Полученная таким образом кривая $M_m = \varphi(t)$ заменяется рядом ступенек с постоянным значением M_m , и дальнейшее решение производится с помощью шаблона экспоненциальной кривой. Имея на отдельных участках, как и в нереверсивном прокатном стане $M_m = \text{const}$, мы можем для построения кривой $M_d = f(t)$ воспользоваться равенством

$$M_d = M_m \left(1 - e^{-\frac{t}{B}} \right) + M_N \cdot e^{-\frac{t}{B}} \quad (263)$$

Способ пользования шаблоном был описан выше в п. 53. Величину необходимого махового момента проф. Губенко предлагает определять по предложенной нами формуле (282) с введением в нее коэффициента неполноты диаграммы β

$$GD^2 = \frac{\beta \cdot t_p \cdot M_N \cdot 375}{n_0 \cdot s_N} \cdot \frac{1}{\ln \frac{M_{m \max} - M_0}{M_{m \max} - M_N \cdot \lambda_M}}$$

где t_p — время чистого резания; $M_{m \max}$ — максимальный момент резания; $\beta = 0,3 \div 0,4$.

Пользование шаблоном дает нам возможность построить первое приближение кривой $M_d = f(t)$ (фиг. 196). По кривой M_d может быть построена кривая $s_d = f(t)$ или $\omega_d = f(t)$.

По кривой скорости строится кривая пути $a = \psi(t)$, что дает возможность уже исправить более точно кривую $M_m = f(t)$. Повторное построение по шаблону даст окончательные кривые.

Весьма удобным для решения рассматриваемой задачи является также метод инж. Савинкова [Л. 105 и 106]. В этом методе, как и в предыдущем, кривая $M_m = f(a)$ считается эквивалентной кривой $M_m = f(t)$.

Построение ведется по равным участкам времени $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_n$. Кривая статического момента делится на участки с одинаковыми значениями времени.

Обратимся к уравнению движения привода, написав его в виде

$$M_d - M_m = -\frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (322)$$

При $\Delta t = \text{const}$ в свою очередь можно написать

$$M_d - M_m = c' \cdot \Delta s, \quad (322')$$

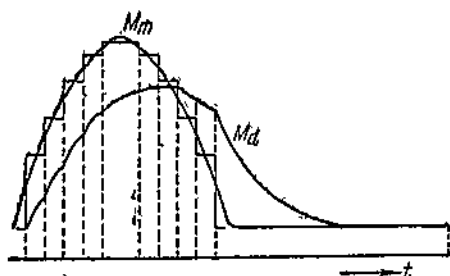
где $c' = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0}{\Delta t}$.

В таком случае динамический момент оказывается пропорциональным Δs .

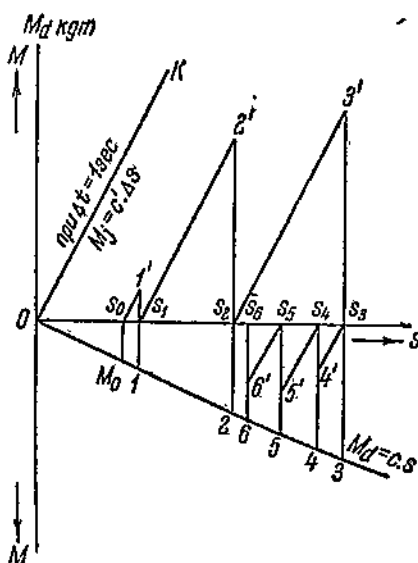
Графически построение ведем следующим образом.

В нижнем квадранте фиг. 197 откладываем кривую $M_d = c \cdot s$. В верхнем квадранте строим прямую $M_j = c' \cdot \Delta s$.

До пика нагрузки двигатель работал в точке I характеристики, развивая момент холостого хода M_0 и идя со скольжением s_0 . Далее двигатель начинает работать при меняющейся нагрузке.



Фиг. 196. Построение кривой $M_d = \psi(t)$ для ножиц по методу шаблона.

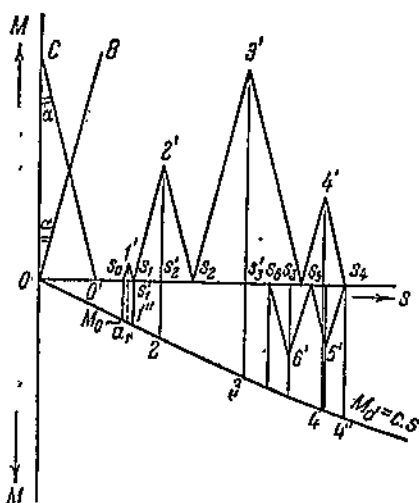


Фиг. 197. Построение кривой $M_d = f(t)$ по методу Савинкова.

Обращаемся к первому участку кривой M_m . В конце этого участка статический момент M_{m1} должен быть покрыт моментом двигателя M_{d1} и динамическим моментом $M_{\mu 1}$. Изменение последнего происходит по прямой OK . Следовательно, через точку, со-

ответствующую s_0 , мы должны провести прямую, параллельную OK до тех пор, пока ордината $I'I'$ не станет равна M_{m1} . Так же решается задача для второго и последующих участков. Линия $s_1 2'$ проводится из точки s_1 параллельно OK . Ордината $2'2$ равна M_{m2} , причем ордината $2s_2$ будет M_{d2} , а $s_2 2'$ будет M_{j2} . Момент двигателя постепенно увеличивается. Мы доходим до такого положения, когда M_{ax} будет больше M_{mx} . С этого момента электропривод начнет разгоняться. Динамический момент должен уже откладываться вниз. Прямая $s_3 4'$ проводится в нижнем квадранте параллельно прямой OK до тех пор, пока $4'4$ не станет равной M_{m3} . В таком случае $M_{ax} = M_m + M_j = 4'4 + 4's_4$. Все дальнейшее построение аналогично. Савинковым в упомянутой статье [Л. 106] дан также номографический способ решения задачи и указан упрощенный способ построения нагрузочной диаграммы моментов двигателя с помощью пропорционального циркуля.

По сравнению с изложенным выше первым методом, основанным на простом применении принципа пропорций, метод Савинкова дает несколько преувеличенные значения моментов двигателя для периодов роста момента исполнительного механизма и несколько преуменьшенные — для периодов уменьшения моментов механизма. Происходит это из того, что метод Савинкова предполагает



Фиг. 198. Уточненный метод Савинкова.

установление динамического равновесия в конце рассматриваемых периодов Δt_x . В первом методе равновесие предполагается в середине периода Δt_x . Поскольку это расхождение имеет величину порядка 2—3%, то практического значения оно не имеет. Однако в целях дальнейшего уточнения своего метода Савинков предлагает производить деление на половинные участки времени $\frac{\Delta t_x}{2}$.

Для первого полупериода изменение динамического момента определяется прямой OB , для второго полупериода прямой $O'C$ (фиг. 198). Равновесие моментов в этом случае получается в середине участка Δt_x . Построение ведется следующим образом.

Начиная от точки s_0 проводится прямая, параллельная OB до тех пор, пока сумма $(M_d + M_j)$ не станет равной M_m в середине участка. От точки I' проводится вниз прямая $I's_1$, параллельная

$O'S$ до оси абсцисс. Дальше построение ведется аналогично и понятно из чертежа.

Подсчеты, проведенные нами для ножниц для порезки заготовки 150×150 мм, по всем четырем разобранным методам дали практически одинаковые величины. Для эквивалентного момента метод шаблона дал расхождение в 1,44%, а первый и второй методы Савинкова соответственно в 0,82 и 0,19% по сравнению с принципом пропорций. Расхождение максимальных моментов двигателя для всех случаев не превысило 3,5% в сторону преувеличения. Расхождения моментов двигателя на отдельных участках по отношению к принципу пропорций достигали—17,9% для роста момента двигателя и 13,3% для уменьшения момента двигателя. Ни один из перечисленных методов никаких преимуществ не имеет. Для практического пользования наиболее удобным оказывается метод Савинкова.

63. Переходные режимы и нагрузочные диаграммы электропривода с шунтовой характеристикой при статическом моменте, зависящем от времени

Следующим классом нагрузочных диаграмм должен был бы рассматриваться класс со статическим моментом, зависящим от пути и скорости $M_m = f(v, L)$. Однако этот класс имеет наибольшее практическое значение для электродвигателей с сериесной характеристикой. Туда мы и отнесем его рассмотрение. Методика применяемых в нем графических решений остается той же самой и для машин с шунтовой характеристикой.

Рассмотрение класса нагрузочных диаграмм с $M_m = f(t)$ часто затрудняется тем обстоятельством, что зависимость статического момента от времени иногда не поддается аналитическому выражению или же аналитическое выражение для статического момента оказывается настолько сложным, что уравнение движения электропривода с ним аналитически не решается. В результате часто приходится прибегать к графическому решению.

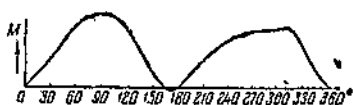
Очевидно, что для решения соответствующих задач при представленном графически статическом моменте $M_m = f(t)$ вполне может быть использован метод Савинкова, изложенный в предыдущем параграфе. Кроме того для целого ряда исполнительных механизмов может быть принята на отдельных небольших участках диаграмм прямолинейная зависимость динамического момента от скорости. При этом может быть использован по участкам аналитический метод, рассмотренный в п. 26, упомянутый также в п. 59.

Мы здесь рассмотрим дополнительно два типичных случая:

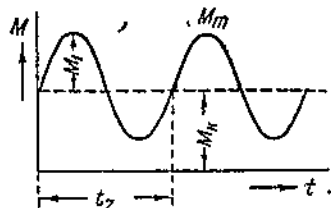
1) статический момент нагрузки изменяется по синусоидальной кривой;

2) задан закон изменения статической мощности от времени: а) мощность механизма остается постоянной; б) мощность механизма растет или падает по закону прямой линии.

Метод эквивалентной синусоиды применяется тогда, когда нагрузочная диаграмма механизма может быть заменена эквивалентной синусоидой или разложена в ряд Фурье. На фиг. 199 представлена нагрузочная диаграмма некоторого поршневого компрессора. Для построения ее, очевидно, необходимо найти статические и динамические усилия. Статические усилия могут быть определены в том случае, если известна индикаторная диаграмма компрессора, размеры цилиндров, угол сдвига кривошипов отдельных цилиндров в многоцилиндровых компрессорах, отношение длины шатуна к длине кривошипа и длина шатунов. Для нахождения динамических моментов необходимо знание весов всех частей, движущихся возвратно-поступательно. Для упрощения



Фиг. 199. Нагрузочная диаграмма некоторого поршневого компрессора.



Фиг. 200. Изменение статического момента по гармонической кривой.

задачи мы можем здесь принимать маховой момент системы, учитывая маховые массы поступательно-движущихся частей некоторым коэффициентом к маховому моменту двигателя.

Поскольку компрессоры бывают различных типов, то и нагрузочные диаграммы могут иметь различный вид, зависящий от класса компрессора, т. е. от числа цилиндров и угла сдвига их кривошипов.

В том случае, когда кривая статического момента может быть заменена эквивалентной синусоидой, решение уравнения движения привода получается весьма простым. В этом случае статический момент (фиг. 200)

$$M_m = M_k + M_1 \cdot \sin at, \quad (323)$$

где $a = \frac{2\pi}{t_z}$. Обозначения понятны из чертежа.

Вращающий момент машины с шунтовой характеристикой выразим через скорость $M_d = \alpha - \beta \cdot \omega$, где

$$\alpha = \frac{M_N \cdot \omega_0}{\omega_0 - \omega_N}, \quad \text{а} \quad \beta = \frac{M_N}{\omega_0 - \omega_N}.$$

Уравнение движения привода получает вид

$$\alpha - \beta \omega = M_k + M_1 \cdot \sin at + J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (324)$$

Найдем частное решение этого дифференциального уравнения, полагая, что ω будет также гармонической функцией времени.

Пусть

$$\omega = \omega_0 + A \cdot \sin at + D \cdot \cos at, \quad (325)$$

где ω_0 — среднее значение скорости, а A и D — параметры.

$$\text{Находим } \frac{d\omega}{dt} = Aa \cos at - Da \sin at. \quad (326)$$

Подставляем значения ω и $\frac{d\omega}{dt}$ из (325) и (326) в (324), получаем

$$\alpha - \beta\omega_0 - \beta A \sin at - \beta D \cos at = M_k + M_1 \sin at + AaJ \cos at - DaJ \sin at.$$

Сопоставляя правые и левые части этого равенства, мы можем сказать, что в них должны быть равны члены, не включающие гармонических функций. Это будет соответствовать средней скорости двигателя, соответствующей среднему моменту, т. е.

$$\alpha - \beta\omega_0 = M_k,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{\alpha - M_k}{\beta}. \quad (327)$$

При $\sin at = 0$ должны быть равны косинусные члены левой и правой части. Это будет при $t = 0$. Соответственно при $\cos at = 0$, т. е. при $t = \frac{1}{a} \arcsin \frac{\pi}{2}$, должны быть равны синусные члены левой и правой части.

Отсюда имеем

$$-\beta \cdot A \cdot \sin at = M_1 \cdot \sin at - DaJ \cdot \sin at \quad (328)$$

и

$$-\beta \cdot D \cdot \cos at = Aa \cdot J \cdot \cos at. \quad (329)$$

Следовательно,

$$A = -\frac{\beta \cdot D}{aJ}.$$

Далее

$$-\beta \cdot A = M_1 - D \cdot a \cdot J,$$

$$+ \frac{\beta^2 D}{aJ} = M_1 - DaJ,$$

$$\beta^2 \cdot D = M_1 \cdot a \cdot J - D \cdot a^3 \cdot J^2,$$

откуда

$$D = \frac{M_1 \cdot a \cdot J}{\beta^2 + a^3 J^2}; \quad A = -\frac{M_1 \cdot \beta}{\beta^2 + a^3 J^2}. \quad (330)$$

Подставляя полученные значения A и D в (325), имеем

$$\omega = \frac{\alpha - M_k}{\beta} - \left[\frac{M_1 \cdot \beta}{J^2 \cdot a^2 + \beta^2} \cdot \sin at - \frac{M_1 \cdot a \cdot J}{J^2 \cdot a^2 + \beta^2} \cdot \cos at \right] = \frac{\alpha - M_k}{\beta} - \frac{M_1}{J^2 \cdot a^2 + \beta^2} (\beta \cdot \sin at - a \cdot J \cdot \cos at). \quad (331)$$

Заменим выражение

$$(\beta \cdot \sin at - a \cdot J \cdot \cos at) = X \cdot \sin(at - \psi).$$

Разлагая правую часть, имеем

$$\beta \cdot \sin at - aJ \cos at = X \sin at \cos \psi - X \cos at \sin \psi,$$

что дает для

$$\beta = X \cos \psi \quad \text{и} \quad aJ = X \sin \psi.$$

Следовательно,

$$X = \sqrt{\beta^2 + a^2 \cdot J^2},$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{aJ}{\beta} = a \cdot B,$$

где B — электромеханическая постоянная электропривода, так как

$$\frac{J}{\beta} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{\omega_0 - \omega_N}{M_N} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0 \cdot s_N}{M_N}.$$

Подставляя полученные значения в (331), имеем

$$\omega = \frac{\alpha - M_k}{\beta} - \frac{M_1 \cdot \sqrt{J^2 a^2 + \beta^2}}{J^2 \cdot a^2 + \beta^2} \cdot \sin(at - \operatorname{arctg} B)$$

или

$$\omega = \frac{\alpha - M_k}{\beta} - \frac{M_1}{\sqrt{J^2 a^2 + \beta^2}} \cdot \sin(at - \operatorname{arctg} B). \quad (332)$$

По изменению скорости может быть найдено и изменение момента двигателя.

Таким образом изменение угловой скорости ω и момента двигателя M_d в этом случае будет происходить также по закону гармоническому, но с некоторым сдвигом относительно кривой моментов компрессора.

Величина сдвига определяется электромеханической постоянной B , т. е. параметрами двигателя и маховым моментом привода.

Колебания скорости лишь в том случае будут совпадать с колебаниями момента нагрузки, когда $J=0$, т. е. когда будут отсутствовать маховые массы. Чем они будут больше, тем меньше колебания скорости двигателя.

При $J=\infty$ член $\frac{M_1}{\sqrt{J^2 \cdot a^2 + \beta^2}}$ превращается в нуль. Скорость двигателя при этом остается постоянной и равной средней скорости ω_0 .

Двигатель в этом случае естественно развивает момент M_k , соответствующий средней скорости.

При более сложной кривой разлагаем ее в ряд Фурье

$$M_m = M_k + \sum M_h \cdot \sin \left(h \cdot \frac{2\pi}{t_z} \cdot t + \alpha_h \right), \quad (333)$$

где M_k — попрежнему среднее значение момента сопротивления; M_h — амплитуда h -той гармоники; α_h — ее начальная фаза; t_z — период кривой.

Уравнение движения электропривода в этом случае напишется в виде

$$\alpha - \beta\omega = M_k + \sum M_h \cdot \sin \left(h \cdot \frac{2\pi}{t_z} \cdot t + \alpha_h \right) + J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (334)$$

Полученное уравнение является линейным. Поэтому нами может быть применен метод наложения. Для решения сначала находим частный интеграл уравнения

$$\alpha - \beta\omega = M_k + J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (335)$$

а затем h раз находим частные интегралы уравнений

$$\alpha - \beta\omega = M_h \cdot \sin \left(h \cdot \frac{2\pi}{t_z} \cdot t + \alpha_h \right) + J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (336)$$

Получившиеся результаты складываем.

Решение (335) дает

$$\omega = \omega_0 \cdot \frac{M_N - M_k \cdot s_N}{M_h}.$$

Решение (336) дает

$$\omega_h = \frac{M_h}{\sqrt{\left(\frac{M_N}{\omega_0 - \omega_N}\right)^2 + \left(h \cdot \frac{2\pi}{t_z} \cdot J\right)^2}} \cdot \sin \left(h \cdot \frac{2\pi}{t_z} \cdot t + \alpha_h - \gamma_h \right),$$

где

$$\gamma_h = \arctg \frac{2\pi h (\omega_0 - \omega_N) \cdot J}{M_N t_z}.$$

В результате общее решение имеет вид

$$\omega = \omega_0 \cdot \frac{M_N - M_k \cdot s_N}{M_N} - \sum \frac{M_h}{\sqrt{\left(\frac{M_N}{\omega_0 - \omega_N}\right)^2 + \left(h \cdot \frac{2\pi}{t_z} \cdot J\right)^2}} \cdot \sin \left(h \cdot \frac{2\pi}{t_z} \cdot t + \alpha_h \cdot \gamma_h \right). \quad (337)$$

Соответственно вращающий момент двигателя

$$M_d = M_k + \sum \frac{M_h}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi h \omega_0 J S_N}{M_N \cdot t_z} \right)^2}} \cdot \sin \left(k \cdot \frac{2\pi}{t_z} \cdot t + \alpha_h - \beta_h \right). \quad (338)$$

Эквивалентный момент двигателя

$$M_s = \sqrt{M_m^2 + \sum \frac{0,5 M_h^2}{1 + \left(\frac{2\pi h \omega_0 J S_N}{M_N \cdot t_z} \right)^2}}. \quad (339)$$

Равенство (339) дает возможность определить необходимое значение J при выбранном M_s в том случае, когда можно пренебрегать всеми гармоническими кроме первой.

К этой же категории диаграмм относятся уравнения движения электропривода, когда статическая мощность рабочей машины или остается постоянной или меняется (растет или убывает) по прямолинейному закону. Так как закон применения скорости до решения уравнения движения привода в данном случае не известен, то не известен и закон изменения момента от времени. В этом случае решение уравнения движения электропривода оказывается удобнее, если оперировать мощностями, а не моментами. К этой же категории задач следует относить и случаи иррегулярного изменения мощности исполнительных механизмов, не поддающиеся математическому выражению. Иррегулярную кривую мощности можно заменять рядом отрезков прямых и решать уравнение движения привода по частям для участков, на которых сохраняется определенный закон изменения мощности.

Типичным представителем этой группы нагрузочных диаграмм является привод асинхронным двигателем с маховиком генератора постоянного тока, который служит для питания реверсивного двигателя постоянного тока, приводящего в движение или реверсивный прокатный стан или шахтный подъемник, или гидроэлектрический пресс.

Ввиду некоторой сложности диаграмм этого вида и ограниченности их применения, мы их здесь не рассматриваем. Подробный разбор этого вопроса дан автором в [Л. 101].

64. Электромеханические переходные режимы в шунтовых двигателях постоянного тока при $M_m = \text{const}$

Изучение электромеханических переходных режимов представляет некоторые трудности вследствие сложности протекающих в двигателях электромагнитных процессов. Наибольшие трудности возникают из-за влияния токов Фуко и переменных значений коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции обмоток. «Точные»

решения возможны в большинстве случаев лишь графо-аналитическим методом, так как законы насыщения магнитной цепи не поддаются простой математической интерпретации.

Мы рассмотрим переходные процессы шунтовой машины здесь лишь несколько упрощенно, а именно:

- 1) пренебрежем влиянием токов Фуко и гистерезиса;
- 2) примем коэффициент самоиндукции обмотки якоря постоянным;
- 3) пренебрежем влиянием реакции якоря.

Сначала будем вести рассмотрение процессов при неизменном установившемся токе возбуждения, а стало быть, при пренебрежении реакции якоря, при $\Phi = \text{const}$ [см. Л. 123].

При работе электродвигателя в переходном режиме мы имеем одновременное протекание двух процессов: электрического и механического.

Первый подчиняется условию равновесия э. д. с. и падений напряжений в цепи якоря, выражаемому уравнением

$$U = IR + L \cdot \frac{dI}{dt} + E, \quad (340)$$

где U — приложенное к цепи двигателя напряжение; E — индуцированная в двигателе э. д. с.; I — сила протекающего через якорь тока; L — коэффициент самоиндукции обмотки якоря. Приведенное уравнение относится к случаю пуска, приема и сброса нагрузки, а также торможению с рекуперацией энергии в сеть. В случае режима противовключения перед э. д. с. E нужно поставить знак минус. При динамическом торможении $U = 0$. Механический процесс подчиняется уравнению

$$\pm M_a \pm M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (65')$$

Характер знаков в (65') для каждого режима был выяснен выше. Так же как и при рассмотрении механических переходных режимов, совместное решение уравнений (65') и (340) мы произведем сразу для всех режимов.

При этом необходимо иметь в виду следующие соображения, касающиеся только условий пуска. Пусковой процесс электропривода распадается на два периода: 1) в первом периоде двигатель стоит, и мы имеем чисто электрический процесс — процесс постепенного нарастания тока; 2) во втором периоде, начинающемся с момента времени, когда момент двигателя M_d достигает значения статического момента покоя M_{m0} , мы имеем разгон двигателя при совместном действии механического и электрического процессов. Во всех остальных режимах мы имеем лишь совместное протекание механических и электрических процессов, так как машина все время находится во вращении.

Рассмотрим сначала процесс нарастания тока при пуске двигателя, до трогания его с места. Этот период имеет преимущественное значение для безреостатного пуска. При этом электри-

ческий процесс в цепи якоря подчиняется дифференциальному уравнению

$$U = IR + L \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (341)$$

Решение этого дифференциального уравнения, как известно, будет иметь вид

$$I = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (342)$$

где $T = \frac{L}{R}$ — постоянная времени электромагнитной инерции, или сокращенно электромагнитная постоянная цепи якоря.

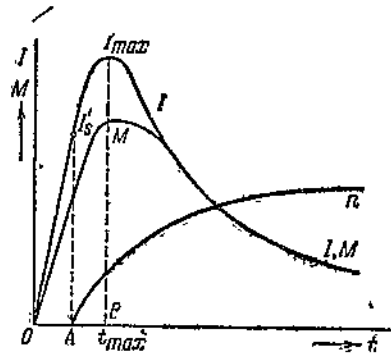
Казалось бы, двигатель должен начать разворачиваться с момента времени, когда ток двигателя достигнет значения I'_s , где I'_s — ток, соответствующий трению покоя (а не движения). Однако, как показывает опыт, момент двигателя M_d вследствие экранирующего действия токов Фуко не растет пропорционально с током, а двигатель берет с места при достижении током значения, часто близкого к $I_{\max \max} = \frac{U}{R}$. Примерный характер изменения тока,

момента и скорости при безреостатном пуске показан на фиг. 201. Некоторые опыты показывают, что при восьмикратном номинальном значении якорного тока в период безреостатного пуска вращающий момент двигателя не превосходит двукратной номинальной величины. В одном из опытов двигатель брал с места лишь по достижении током $10I_N$. Это обстоятельство давало некоторым авторам основание считать, что двигатель трогается с места лишь после достижения током максимального значения, равного $I_{\max \max} = \frac{U}{R}$.

Однако в действительности толчок тока получается несколько меньше, так как машина еще до достижения $I_{\max \max}$ берет с места, и пик тока определяется равенством

$$I_{\max} = \frac{U - E}{R}.$$

Обозначим ток, при котором машина трогается с места и теоретическое определение которого представляет большие трудности, через I'_s .



Фиг. 201. Изменение тока, момента и скорости шунтового двигателя при безреостатном пуске.

В таком случае

$$I_s = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_s}{T}} \right).$$

Период, проходящий от момента включения до момента трогания, будет

$$t_s = T \cdot \ln \left(\frac{U}{U - I_s \cdot R} \right). \quad (343)$$

Степень отклонения максимума тока от величины $\frac{U}{R}$ определяется влиянием токов Фуко в данной машине и зависит от махового момента электропривода GD^2 , коэффициента самоиндукции якоря L и статического момента M_m . Ввиду трудностей учета влияния токов Фуко точное значение I_{\max} для каждого частного случая может быть установлено лишь опытом. Несомненно, что величина I_{\max} зависит от насыщения. Так, при безреостатном включении инж. Linke шунтового двигателя мощностью в 60 kW к генератору на 1000 kW (в целях уменьшения влияния падения напряжения) максимальные толчки тока получались:

при включении на 220 V	$I_{\max} = 0,54 I_{\max \max}$
» » » 300 »	$I_{\max} = 0,59 I_{\max \max}$
» » » 370 »	$I_{\max} = 0,65 I_{\max \max}$
» » » 440 »	$I_{\max} = 0,72 I_{\max \max}$

Третин [Л. 110] при включении двигателя мощностью в 245 kW, на половинное напряжение 110 V получил $I_{\max} = 0,77 I_{\max \max}$ для этого напряжения. При этом опыт проводился при холостом ходе двигателя. Опыты Linke показали также значительное влияние на толчок тока махового момента электропривода. Так, при холостом ходе $I_{\max} = 0,5 I_{\max \max}$. При $M_m = 0$ и добавочном маховом моменте на валу, равном маховому моменту двигателя, $I_{\max} = 0,61 I_{\max \max}$. При $M_m = 0$ и добавочном маховом моменте, равном 49 маховым моментам двигателя, $I_{\max} = 0,85 I_{\max \max}$. Эфрос [Л. 112], исследуя вопрос о максимальном толчке тока в пренебрежении влиянием токов Фуко применительно к шунтовому двигателю, пускаемому холостую, пришел к заключению, что в зависимости от соотношения L, R и GD^2 максимум тока при аperiodическом режиме лежит между $0,735 I_{\max \max}$ и $I_{\max \max}$ и при периодическом режиме между $0,645 I_{\max \max}$ и $I_{\max \max}$. Однако опыты Linke дали меньшие цифры, как, например, 0,54 и 0,5 $I_{\max \max}$. Следовательно, точное значение максимума тока может быть получено лишь при учете влияния токов Фуко.

Обратимся к совместному решению уравнений механического и электрического равновесия. Это решение относится ко второму периоду пуска после трогания двигателя с места и ко всем другим режимам.

Из (65) находим

$$\omega = \frac{1}{J} \int (\pm k_1 I \pm M_m) \cdot dt. \quad (344)$$

Заменяем в (340) э: д. с. $E = k'_2 \cdot \omega$ и подставим в него вместо ω (344)

$$U = IR + L \cdot \frac{dI}{dt} + k'_2 \cdot \frac{1}{J} \int (\pm k_1 I \pm M_m) dt. \quad (345)$$

Продифференцировав (345), получим

$$0 = R \cdot \frac{dI}{dt} + L \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} \pm \frac{k'_2}{J} (\pm k_1 I \pm M_m), \quad (346)$$

Приводя (346) к нормальному виду линейного дифференциального уравнения второго порядка с последним членом, получим

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{k_1 k'_2}{LJ} \cdot I = \pm \frac{k'_2 M_m}{L \cdot J}. \quad (347)$$

В соответствии с ранее принятыми обозначениями

$$\frac{L}{R} = T; \quad \frac{k_1 \cdot k'_2}{L \cdot J} = \frac{1}{B \cdot T},$$

так как

$$\begin{aligned} \frac{k_1 \cdot k'_2}{L \cdot J} &= \frac{M_N \cdot U}{I_N \cdot \omega_0} = \frac{M_N \cdot U \cdot 375}{L \cdot GD^2 \cdot n_0 \cdot I_N} = \frac{375 \cdot M_N \cdot U \cdot R}{L \cdot n_0 \cdot (U - E_N) \cdot GD^2} \\ &= \frac{1}{T} \cdot \frac{M_N \cdot 375}{GD^2 \cdot n_0 \cdot s_N} = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{B}. \end{aligned}$$

Уравнение (346') получает вид

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{1}{T} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{1}{T \cdot B} I = \pm \frac{M_m}{k_1 \cdot T \cdot B} = \pm \frac{I_s}{T \cdot B}. \quad (348)$$

Решая это уравнение, находим корни характеристического уравнения

$$\gamma^2 + \frac{1}{T} \cdot \gamma + \frac{1}{B \cdot T} = 0. \quad (349)$$

Корни его будут

$$\gamma_{1,2} = -\frac{1}{2T} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4T}{B}} \right). \quad (350)$$

Ограничимся рассмотрением наиболее часто встречающегося случая вещественных неравных корней, т. е. аperiodическим режимом. Общий интеграл уравнения (348)

$$I = A_1 \cdot e^{\gamma_1 t} + A_2 \cdot e^{\gamma_2 t} + I',$$

где I' — частное решение уравнения с последним членом.

Так как

$$\frac{dI'}{dt} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{d^2 I'}{dt^2} = 0,$$

то, подставляя в (347), получим

$$\frac{k_1 k_2}{L \cdot J} I' = \pm \frac{k_2' M_m}{L \cdot J},$$

откуда

$$I' = \pm \frac{M_m}{k_1} = \pm I_s.$$

Общий интеграл уравнения получает вид

$$I = A_1 e^{\gamma_1 t} + A_2 e^{\gamma_2 t} \pm I_s. \quad (351)$$

* Постоянные интегрирования для каждого режима (пуск, тот или иной вид торможения) должны находиться отдельно. Мы здесь определим их лишь для условий пуска.

Изменение тока согласно уравнению (351) начнется с того момента времени, когда двигатель тронется с места. Это будет при $I_d = I_s$, по истечении промежутка времени t_s , определяемого равенством (343).

Таким образом получаем следующие начальные условия для определения коэффициентов в (351). При $t=0$; $\omega_d=0$, $I=I_d=I_s$.

Подставляя эти условия в (351), получаем

$$I_d = A_1 + A_2 + I_s. \quad (352)$$

Далее при тех же условиях

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_1 A_1 + \gamma_2 A_2 = \frac{U - RI_d}{L}. \quad (353)$$

Решая (352) совместно с (353), получим

$$A_1 = \frac{\frac{U - RI_s}{L} - (I_s - I_s) \cdot \gamma_2}{\gamma_1 - \gamma_2}, \quad (354)$$

$$A_2 = - \frac{\frac{U - RI_s}{L} - (I_s - I_s) \cdot \gamma_1}{\gamma_1 - \gamma_2}. \quad (355)$$

Сложение отдельных составляющих показано на фиг. 202. Кривая тока складывается из постоянного значения I_s , положительной экспоненты с небольшой начальной ординатой, но с большой постоянной времени, т. е. с малым абсолютным значением γ_1

$$\left[\gamma_1 = -\frac{1}{2T} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4T}{B}} \right) \right]$$

и отрицательной быстро затухающей экспоненты с большой начальной ординатой $|A_2| \leftarrow = |A_1| + |I_s|$, т. е. с большим абсолютным значением γ_2 и малой постоянной времени

$$\left[\gamma_2 = -\frac{1}{2T} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T}{B}} \right) \right].$$

Аналогично можно решать уравнение и для скорости. Для случая пуска при положительном M_m .

Из (65) имеем

$$I = \frac{J}{k_1} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_m}{k_1} \quad (356)$$

Дифференцируя (356) по t , получим

$$\frac{dI}{dt} = \frac{J}{k_1} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} \quad (357)$$

Подставляя (356) и (357) в (340) и заменяя E через $k'_2 \omega$, получим

$$U = \frac{RJ}{k_1} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_m \cdot R}{k_1} + \frac{LJ}{k_1} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + k'_2 \cdot \omega.$$

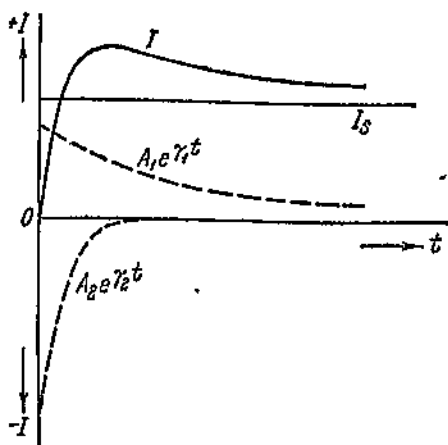
Так как $U = k'_2 \cdot \omega_0$, то

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{1}{T} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{T \cdot B} \cdot \omega = + \left(\frac{\omega_0}{T \cdot B} - \frac{M_m}{J \cdot T} \right). \quad (358)$$

Характеристическое уравнение для этого дифференциального уравнения одинаково с таковым для тока. Общий интеграл этого уравнения

$$\omega = D_1 e^{\gamma_1 t} + D_2 \cdot e^{\gamma_2 t} + \omega', \quad (359)$$

$$\frac{d\omega'}{dt} = 0; \quad \frac{d^2\omega'}{dt^2} = 0.$$



Фиг. 202. Отдельные составляющие тока переходного режима при пуске.

Подставляя эти значения в (358), получим

$$\omega' = + \left(\omega_0 - \frac{M_m \cdot B}{J} \right) = + \omega_s,$$

так как

$$\begin{aligned} \omega_0 - \frac{M_m B}{J} &= \omega_0 - \frac{M_m \cdot GD^2 \cdot n_0 \cdot s_N}{J \cdot 375 \cdot M_N} = \omega_0 - \frac{\omega_0 (U - E_s)}{U} = \\ &= \omega_0 \left(1 - \frac{I_s R}{U} \right) = \omega_s, \end{aligned}$$

где ω_s — статическая угловая скорость, соответствующая M_m и E_s .
Начальные условия будут: при $t=0$, $\omega = 0$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_d - M_m}{J},$$

Подставляя эти уравнения в (359) и выражение для его производной, имеем

$$\omega = 0 = D_1 + D_2 + \left(\omega_0 - \frac{M_m \cdot B}{J} \right)$$

и

$$\frac{M_d - M_m}{J} = \gamma_1 \cdot D_1 + \gamma_2 \cdot D_2,$$

откуда

$$D_1 = - \frac{\frac{M_d - M_m}{J} - \left(\omega_0 - \frac{M_m \cdot B}{J} \right) \gamma_2}{\gamma_2 - \gamma_1}, \quad (360)$$

$$D_2 = \frac{\frac{M_d - M_m}{J} - \left(\omega_0 - \frac{M_m \cdot B}{J} \right) \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1}. \quad (361)$$

Постоянные интегрирования A_1 , A_2 , D_1 , D_2 нами определены для первой ступени пуска или для безреостатного пуска. При обычном методе пуска при переходе с одной ступени на другую меняются из-за переключения сопротивлений показатели экспонент γ_1 и γ_2 , так как в них входит $T = \frac{L}{R}$ и

$$B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_N = \frac{GD^2 \cdot R}{375 k_1 k_2},$$

где R — общее сопротивление цепи якоря.

Постоянные A_1 , A_2 , D_1 , D_2 для каждого участка будут иметь свои значения и должны определяться из начальных условий каждой ступени. Эти условия для n -ной ступени будут при $t=0$;

$$\omega = \omega_{нач}; \quad I = I_{нач}; \quad \frac{dI}{dt} = \frac{U - E - R_x I_{нач}}{L}; \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_d - M_m}{J}.$$

Не входя здесь в подробный разбор других режимов работы электропривода с шунтовым двигателем при $M_m = \text{const}$ и при $\Phi = \text{const}$, отметим, что полученные выше решения применимы ко всем режимам без исключения. Все различие отдельных решений будет лишь в частном решении и величинах подинтегральных постоянных, которые должны определяться из начальных условий. Заметим, что аналитическим способом могут быть также найдены решения и при $M_m = c \cdot n$. Для вентиляторного момента, и M_m , зависящего от пути или времени, необходимо применение одного из графо-аналитических методов, излагаемых далее.

Краткие основы этих методов будут изложены далее применительно ко всем двигателям постоянного тока.

65. Простейшие методы определения коэффициента самоиндукции обмотки якоря машин постоянного тока

Из изложенного видно, что в переходных процессах двигателей постоянного тока большую роль играет коэффициент самоиндукции обмотки якоря. При учете коэффициента самоиндукции обмотки якоря необходимо принять во внимание следующие потоки рассеяния: 1) потоки рассеяния обмотки якоря: а) лазовых частей ее; б) лобовых частей; 2) потоки рассеяния добавочных полюсов; 3) потоки взаимной индукции якоря и добавочных полюсов; 4) потоки рассеяния компенсационной обмотки, если последняя имеется; 5) потоки взаимной индукции якоря и компенсационной обмотки, а при отсутствии последней поток реакции якоря. Определение всех этих составляющих представляет большие трудности в особенности из-за влияния насыщения и токов Фуко. Полностью эта задача на сегодняшний день теоретически и экспериментально не разрешена. Теоретический расчет не дает пока вполне надежных результатов для всех случаев. Не касаясь методов теоретического расчета, мы приведем здесь лишь простейшие способы экспериментального определения.

Наиболее целесообразным и точным на сегодняшний день следует считать метод осциллографирования якорного тока неподвижной машины в вариантах постоянной времени и равновесия напряжений. При этом осциллографируется закон нарастания тока в неподвижном якоре при включении его на сеть или лучше закон спадания тока при шунтировке якоря по схеме фиг. 203.

Снимая осциллограмму нарастания тока, можно написать

$$U = L \frac{di}{dt} + iR. \quad (341)$$

Отсюда следует, что

$$L = \frac{U - iR}{\frac{di}{dt}}. \quad (362)$$

Беря для отдельных участков осциллограммы i и $\frac{\Delta i}{\Delta t}$, можно найти мгновенные значения L . Указанные расчеты дадут возможность получить кривую $L = f(i)$. Если хотя бы в расчете переходных режимов оперировать с постоянным эквивалентным значением L за весь переходной период t_p , то это эквивалентное значение находят следующим образом.

Перенесем равенство (341) в форме

$$L \cdot di = (U - iR) \cdot dt,$$

Полагая $L = \text{const}$ и интегрируя в пределах от $i = 0$ до $i = I_k$, получим

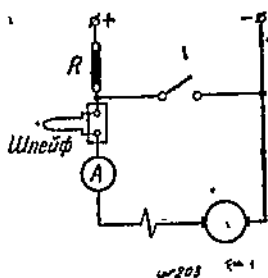
$$L_s \cdot I_k = U \cdot t_y - R \int_0^{t_y} i dt = R \left(\frac{U}{R} \cdot t_y - \int_0^{t_y} i dt \right).$$

Разность, стоящая в скобках, представляет площадь, ограниченную горизонталью, отстоящей от оси абсцисс на расстоянии $\frac{U}{R}$, и кривой $i = f(t)$ (фиг. 204). Очевидно, что

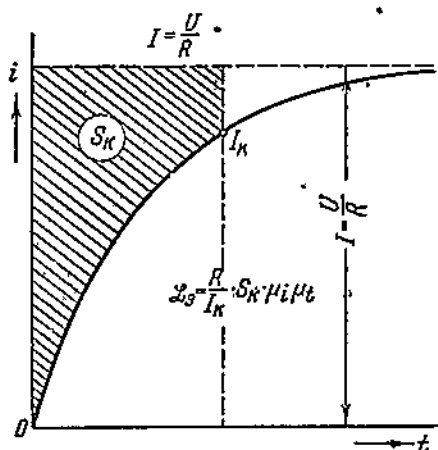
$$L_s = \frac{R}{I_k} \cdot S_k \cdot \mu_i \cdot \mu_t, \quad (363)$$

где μ_i и μ_t — масштаб тока и времени.

Частое отсутствие осциллографа при исследовании повело в последние годы к применению для определения коэффициента самоиндукции метода перемен-



Фиг. 203. Выключение обмотки якоря и шлейфа осциллографа для снятия осциллограммы.



Фиг. 204. Нахождение эквивалентного коэффициента самоиндукции.

ного тока. При этом неподвижный якорь приключается к сети переменного тока, частоту которого можно варьировать. Обмотка возбуждения при опыте замкнута накоротко. При этом для разных частот определяют мощность P , напряжение U и силу тока I . Коэффициент самоиндукции

$$L = \frac{\sqrt{U^2 I^2 - P^2}}{\omega I}. \quad (364)$$

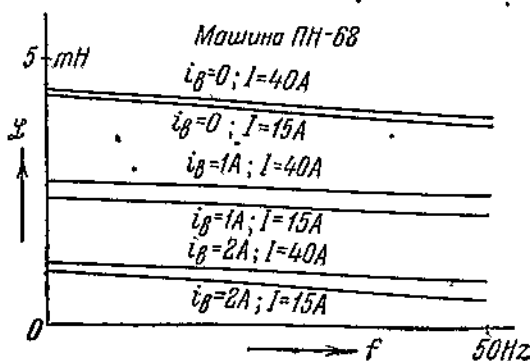
Измерение производит при $i = \text{const}$ для нескольких частот f и строит кривую $L = f(f)$. Экстраполируя ее на частоту $f = 0$, находят L при постоянном токе. Определение L должно быть сделано для разных условий насыщения.

Ряд кривых, снятых в лаборатории электропривода Левиным и Рудаковым, показан на фиг. 205. Кривые показывают влияние на коэффициент самоиндукции частоты, тока и насыщения.

Трудности экспериментального определения L побудили американцев Уманского и Ливилля предложить простой метод определения коэффициента самоиндукции. Имми дана формула для крупных машин

$$L = \beta \cdot \frac{U_N}{I_N} \cdot \frac{1}{2\pi p n_N} \cdot 60, \quad (365)$$

где β — некоторый средний коэффициент, полученный из теоретических формул, но проверенный экспериментально и равный для некомпенсированных машин 0,6, для компенсированных — 0,25. В приведенной формуле U_N и I_N — номинальное напряжение и ток машины; n_N — номинальное число оборотов в минуту; p — число пар полюсов.



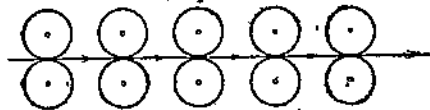
Фиг. 205. Изменение коэффициента самоиндукции якоря в зависимости от частоты

66. Мгновенное падение скорости шунтового двигателя при ударной нагрузке и способы его устранения

При работе шунтовых двигателей на ударную нагрузку получающееся динамическое падение скорости оказывается обычно больше статического, т. е.

$$\frac{U - L \cdot \frac{di}{dt}}{c \cdot \Phi} = n_{din} > n_{ст} = \frac{U - I_s R}{c \cdot \Phi}$$

В ряде случаев это обстоятельство может вести к затруднениям в производственном процессе, когда продукт находится в отдельных звеньях рабочей машины, приводимых отдельными двигателями. Так в непрерывных прокатных станах (фиг. 206) необходимо, чтобы объем металла, проходящий через сечения отдельных клетей, оставался постоянным. Если длина металла после некоторой клетки будет l_k , вытяжка (удлинение)



Фиг. 206. Одновременное нахождение металла в нескольких клетях непрерывного прокатного стана.

металла в этой клетке $\lambda_k = \frac{l_k}{l_{k-1}}$ и сечение после выхода из этой клетки s_k , скорость металла при этом v_k , то можно написать

$$\frac{\lambda_1 l_0 s_1}{s_1 v_1} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot l_0 \cdot s_2}{s_2 \cdot v_2} = \dots = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_k \cdot l_0 \cdot s_k}{s_k \cdot v_k} = t_2,$$

где t_2 — время прокатки металла в каждой клетке.

При числе оборотов валков отдельных клеток n_1, n_2, \dots, n_k и соответственно при диаметрах валков D_1, D_2, \dots, D_k получим

$$\frac{l_0 \cdot \lambda_1}{n_1 \cdot D_1} = \frac{l_0 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{n_2 \cdot D_2} = \dots = \frac{l_0 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_n}{n_n \cdot D_n} \quad (366)$$

Приведенное соотношение скоростей должно соблюдаться на непрерывном прокатном стане как для статических, так и для динамических условий работы.

Ударная нагрузка, свойственная прокатным станам, ведет к тому, что скорость двигателя при входе металла в валки падает, а затем при выходе металла из валков снова повышается. Это колебание скорости отзывается естественно на металле. В начале применения подобных многодвигательных электроприводов постоянного тока борьбу с указанным явлением вели не совсем правильно, путем применения двигателей с малым падением скорости или путем использования быстродействующих регуляторов, которые должны были восстанавливать скорость двигателя при ударе нагрузки до скорости холостого хода.

Однако этими мероприятиями достигалась лишь компенсация статического, а не динамического падения скорости. Анализ этих вопросов применительно к трубопрокатному стану Форена, намечавшемуся к установке в СССР, выявил ряд иных принципиально важных моментов.

Рассмотрим сначала кратко физические процессы, происходящие при ударной нагрузке, а затем дадим математический анализ вопроса.

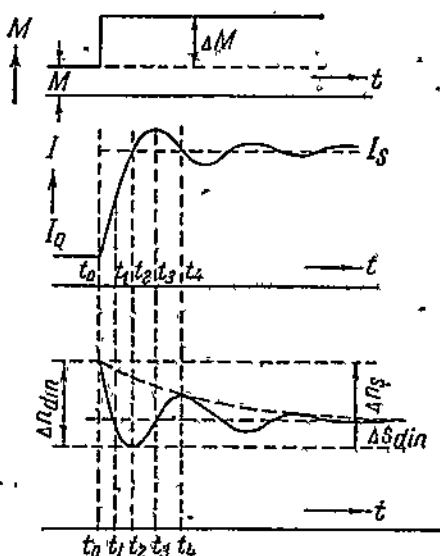
При холостом ходе двигателя постоянного тока существует равенство

$$U = E + I_0 R.$$

При вхождении металла в валок скорость двигателя быстро падает, так как его момент $M_d = c \cdot I_0 \Phi$ не уравновешивает приложенного статического момента. Изменение скорости и тока двигателя будет происходить по кривым фиг. 207. В момент времени t_1 ,

Фиг. 207. Изменение момента скорости и тока двигателя при ударной нагрузке.

когда скорость упадет на Δn_1 , равновесия между моментом двигателя и статическим еще не будет, так как самоиндукция задержит нарастание тока. В момент t_2 , когда ток достигнет I_2 , скорость вращения $n < n_0 - \Delta n_1$. Далее ток, задержанный самоин-



дукцией, будет продолжать нарастать до максимума $I_{\max} > I_s$. Двигатель начнет ускоряться и достигнет скорости $n = n_0 - \Delta n_s$. Однако в этот момент ток двигателя $I_d > I_s$. Двигатель перейдет через статическую скорость n_s . При достижении током I значения I_s скорость будет больше n_s . Обратная э. д. с. будет больше значения, необходимого для получения I_s . Ток и скорость начнут уменьшаться. Далее явление повторяется, и система приходит к установившемуся равновесию после ряда колебаний, обычно очень непродолжительных, так как энергия колебательных процессов будет быстро поглощена электрическими и механическими потерями в системе. Фиг. 207 ясно показывает, что динамическое падение скорости Δn_{din} может быть больше статического Δn_s . Динамическое падение скорости не может быть исправлено ни малым значением Δn_s , ни воздействием регуляторов.

Анализ производственных процессов и в частности процесса трубопрокатного стана Форена приводит к заключениям о следующих необходимых в этом случае свойствах двигателей постоянного тока:

- 1) величина динамического падения скорости должна быть наименьшей;
- 2) последующее восстановление скорости должно быть малым;
- 3) кривая изменения скорости двигателя в переходном режиме должна иметь апериодический характер [Л. 115 и 116].

Произведем краткий математический анализ переходного процесса, исходя из условий: $M_m = \text{const}$; $\Phi_a = \text{const}$ и $L = \text{const}$. При этом мы пренебрежем влиянием токов Фуко и гистерезиса и влиянием реакции якоря.

Происходящий при этом процесс переходных режимов определяется уравнениями равновесия электрической цепи якоря и механической системы электропривода:

$$U = E + IR + L \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (340)$$

$$M_d = M_0 + \Delta M + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (65'')$$

Для непосредственного выявления влияния пика нагрузки мы в равенстве (65'') постоянный статический момент M_m заменили величиной $(M_0 + \Delta M)$, где M_0 — момент холостого хода стана, а ΔM — прикладываемый мгновенно дополнительный статический момент нагрузки. Совместное решение двух приведенных уравнений применительно к апериодическому режиму было сделано выше (п. 63).

Дифференциальное уравнение (358) применительно к числу оборотов в минуту напишется в виде

$$\frac{d^2 n}{dt^2} + \frac{1}{T} \frac{dn}{dt} + \frac{1}{T \cdot B} \cdot n = \frac{n_0}{T \cdot B} - \frac{(\Delta M + M_0)}{T \cdot \frac{GD^2}{375}}. \quad (367)$$

Характеристическое уравнение для (367) будет иметь вид (349) и будет иметь те же корни

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2T} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4T}{B}} \right) = -\frac{1}{2T} \sqrt{\frac{1}{4T^2} - \frac{1}{T \cdot B}}. \quad (368)$$

Однако выше мы ограничились лишь рассмотрением одного вида общего интеграла уравнения (358), а именно аperiodическим режимом, который получается при двух неравных действительных корнях характеристического уравнения, т. е. при $1 > \frac{4T}{B}$. Как известно, общий интеграл (358) может иметь еще два других вида: 1) один для случая двух действительных равных корней, т. е. при $1 = \frac{4T}{B}$; 2) другой при двух сопряженных комплексных корнях, т. е. при $1 < \frac{4T}{B}$.

Для рассматриваемого нами здесь варианта работы наибольшее значение имеет последний случай, так как мы должны выяснить условия, при которых в нашей системе колебания скорости (и тока) или не имели бы места или обладали бы малой амплитудой и быстро затухали.

Условие чисто аperiodического процесса определяется равенством $B > 4T$. Однако в действительной практике рассматриваемых электроприводов это соотношение получить не удается и оказывается, что $B < 4T$. Поэтому колебания скорости имеют место. Рассмотрим получающиеся при этом законы колебания и тока. При мнимых корнях полное решение уравнения (367) будет иметь вид

$$n = A \cdot e^{-\frac{t}{2T}} \cdot \sin(\psi t + \vartheta) + D, \quad (369)$$

где $\psi = \sqrt{\frac{1}{TB} - \frac{1}{4T^2}}$ [см. равенство (368)], а D — частное решение уравнения (368) вида $D = n'$.

Найдем это частное решение. Так как $\frac{dn'}{dt} = 0$, $\frac{d^2n'}{dt^2} = 0$, то из (367) можно написать

$$\frac{1}{T \cdot B} \cdot D = \frac{n_0}{T \cdot B} - \frac{\Delta M + M_0}{T \cdot \frac{GD^2}{375}},$$

откуда

$$D = n_0 - \frac{(\Delta M + M_0) \cdot B}{\frac{GD^2}{375}} = n_0 - n_0 \cdot \frac{M_0 + \Delta M}{M_N} \cdot s_N, \quad (370)$$

так как

$$B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_N$$

Полное решение уравнения (369) будет иметь вид

$$n = A \cdot e^{-\frac{t}{2T}} \cdot \sin(\psi t + \delta) + n_0 - n_0 \cdot \frac{M_0 + \Delta M}{M_N} \cdot s_N. \quad (371)$$

Постоянные интегрирования A и δ находим из начальных условий. При $t=0$

$$n = n_{s0}; \quad \frac{dn}{dt} = -\frac{\Delta M}{\frac{GD^2}{375}}. \quad (372)$$

Скорость n_{s0} , соответствующая моменту M_0 и существовавшая до приложения момента ΔM , будет

$$n_{s0} = n_0 - \frac{RM_{s0}}{k^2} = n_0 - \frac{\dot{R} \cdot M_0}{k_1 k_2}. \quad (373)$$

Подставим (373) в (371) при $t=0$, получим

$$n_0 - \frac{RM_0}{k_1 k_2} = A \cdot \sin \delta + n_0 - n_0 \cdot \frac{M_0 + \Delta M}{M_N} \cdot s_N. \quad (374)$$

Так как согласно равенствам (260) и (265) $\frac{RM_0}{k_1 k_2} = \frac{n_0 \cdot M_0 \cdot s_N}{M_N}$, то

$$A \cdot \sin \delta = \frac{n_0 \cdot \Delta M \cdot s_N}{M_N}, \quad (375)$$

Далее

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{2T} \cdot A \cdot e^{-\frac{t}{2T}} \cdot \sin(\psi t + \delta) + A \cdot e^{-\frac{t}{2T}} \cdot \psi \cdot \cos(\psi t + \delta). \quad (376)$$

Так как при $t=0$ $\frac{dn}{dt} = -\frac{\Delta M}{\frac{GD^2}{375}}$,

то

$$-\frac{\Delta M}{\frac{GD^2}{375}} = -\frac{1}{2T} \cdot A \cdot \sin \delta + A \cdot \psi \cdot \cos \delta. \quad (377)$$

Определяя из (375) $\sin \delta$, выражая $\cos \delta$ через $\sin \delta$ и подставляя в (377), получим

$$\frac{1}{2T} \cdot \frac{n_0 \cdot \Delta M \cdot s_N}{M_N} - \frac{\Delta M}{\frac{GD^2}{375}} = A \cdot \psi \cdot \sqrt{\frac{M_N^2 \cdot A^2 - n_0^2 \cdot (\Delta M)^2 \cdot s_N^2}{M_N^2 \cdot A^2}} \quad (378)$$

Возводя равенство (378) в квадрат, получим

$$\frac{(\Delta M)^2}{\psi^2} \left[\frac{1}{2T} \cdot \frac{n_0 \cdot s_N}{M_N} - \frac{1}{\frac{GD^2}{375}} \right]^2 = A^2 - \frac{n_0^2 (\Delta M)^2 \cdot s_N^2}{M_N^2},$$

$$A^2 = \frac{(\Delta M)^2}{\psi^2} \left[\frac{1}{4T^2} \cdot \frac{n_0^2 \cdot s_N^2}{M_N^2} - \frac{n_0 \cdot s_N}{T \cdot M_N} \cdot \frac{GD^2}{375} + \frac{1}{\left(\frac{GD^2}{375}\right)^2} + \frac{n_0^2 \cdot s_N^2}{M_N} \cdot \psi^2 \right],$$

откуда, подставляя значение ψ , получим

$$A = \pm \frac{\Delta M}{\psi \cdot \frac{GD^2}{375}} = \pm \frac{\Delta M}{\sqrt{\frac{1}{TB} - \frac{1}{4T^2} \cdot \frac{GD^2}{375}}} \quad (379)$$

Соответственно

$$\left. \begin{aligned} \sin \delta &= \pm \frac{n_0 \cdot s_N}{M_N} \cdot \sqrt{\frac{1}{TB} - \frac{1}{4T^2} \cdot \frac{GD^2}{375}} = \pm \\ &= \pm \sqrt{\frac{1}{TB} - \frac{1}{4T^2}} \cdot B = \pm B \cdot \psi = \pm \sqrt{\frac{B}{T} - \frac{B^2}{4T^2}} \end{aligned} \right\} \quad (380)$$

Таким образом окончательное решение будет иметь вид

$$n = n_0 \left(1 - \frac{M_0 + \Delta M}{M_N} \cdot s_N \right) - \frac{\Delta M}{\psi \cdot \frac{GD^2}{375}} \cdot e^{-\frac{t}{2T}} \cdot \sin [\psi t - \arcsin B \psi]. \quad (381)$$

Решение уравнения для силы тока может быть получено обычным образом. Оно будет иметь вид, аналогичный (348),

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{1}{T} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{1}{T \cdot B} \cdot I = \frac{1}{TB} (I_0 + \Delta I). \quad (382)$$

Характеристическое уравнение для I одинаково с таковым для n . Как и при анализе изменения скорости, мы здесь ограничимся и для тока рассмотрим лишь случая комплексных сопряженных корней. Полное решение уравнения для тока может быть найдено быстрее, если мы используем равенство

$$I = I_0 + \Delta I + \frac{GD^2}{375 \cdot k_1} \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (383)$$

полученное подстановкой в уравнение движения привода вместо моментов — токов ($M = k_1 I$), и подставим в него производную $\frac{dn}{dt}$, найденную из (381), также заменив $\Delta M = k_1 \cdot \Delta I$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{k_1 \cdot \Delta I}{2T \cdot \psi \cdot \frac{GD^2}{375}} \cdot e^{-\frac{t}{2T}} \cdot \sin (\psi t - \arcsin B \cdot \psi) - \\ &- \frac{k_1 \cdot \Delta I}{\psi \cdot \frac{GD^2}{375}} \cdot \psi \cdot e^{-\frac{t}{2T}} \cdot \cos (\psi t - \arcsin B \cdot \psi), \end{aligned} \right\} \quad (384)$$

Следовательно, согласно (383)

$$\left. \begin{aligned} I = I_0 + \Delta I + \frac{\Delta I}{2T \cdot \psi} e^{-\frac{t}{2T}} \cdot \sin(\psi t - \arcsin B\psi) - \\ - \Delta I \cdot e^{-\frac{t}{2T}} \cdot \cos(\psi t - \arcsin B\psi). \end{aligned} \right\} (385)$$

Для сопоставления фазы тока с фазой скорости можно написать

$$\left. \begin{aligned} -I = I_0 + \Delta I + \frac{\Delta I}{2T \cdot \psi} e^{-\frac{t}{2T}} [\sin(\psi t - \arcsin B\psi) - \\ - 2T \cdot \psi \cos(\psi t - \arcsin B\psi)]. \end{aligned} \right\} (386)$$

Обозначим

$$\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + 4T^2 \cdot \psi^2}}; \quad \sin \gamma = \frac{2T\psi}{\sqrt{1 + 4T^2 \cdot \psi^2}}.$$

В таком случае

$$\left. \begin{aligned} I = I_0 + \Delta I + \frac{\Delta I}{2T \cdot \psi} \sqrt{1 + 4T^2 \cdot \psi^2} e^{-\frac{t}{2T}} [\sin(\psi t - \\ - \arcsin B\psi) - \cos \gamma - \cos(\psi t - \arcsin B\psi) \cdot \sin \gamma] = I_0 + \Delta I + \\ + \frac{\Delta I \sqrt{1 + 4T^2 \cdot \psi^2}}{2 \cdot T \cdot \psi} \cdot e^{-\frac{t}{2T}} \left[\sin(\psi t - \arcsin B\psi - \right. \\ \left. - \arcsin \frac{2T\psi}{\sqrt{1 + 4T^2 \psi^2}} \right], \end{aligned} \right\} (387)$$

где

$$\frac{\sqrt{1 + 4T^2 \psi^2}}{2T\psi} = \sqrt{\frac{4T}{4T - B}}.$$

Полученные выражения для скорости (381) и тока (387) показывают, что изменения той и другой величины характеризуются гармоническим колебательным затухающим процессом частоты $f = \frac{\psi}{2\pi}$ относительно установившихся значений скорости и тока двигателя, соответствующих нагрузке $(M_0 + \Delta M)$. Коэффициент затухания кривых определяется величиной электромагнитной постоянной T .

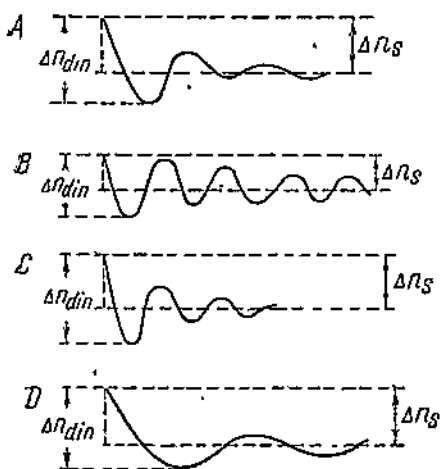
Амплитуда колебаний равна

$$\psi \cdot \frac{\Delta M}{375} = \frac{\Delta M}{375} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{TB} - \frac{1}{4T^2}}} \quad \text{для момента и} \quad \frac{\Delta I (1 + 4T^2 \cdot \psi^2)}{2T\psi} \quad \text{для тока,}$$

Колебания тока сдвинуты относительно колебаний скорости на угол γ .

Задача дальнейшего рассмотрения полученных решений должна заключаться в том, чтобы выяснить влияние параметров электропривода на характер его колебаний. Параметры должны быть подобраны так, чтобы динамическое падение скорости было минимальным. Основными параметрами электропривода при заданном значении ΔM будут T (т. е. L и R) и GD^2 .

Графическое пояснение вопроса для разных условий представлено для скорости на фиг. 208. Очевидно прежде всего, что соотношения L , R и GD^2 влияют непосредственно на частоту колебаний. Рассмотрим влияние отдельных параметров на динамическое падение скорости. Некоторый произвольный закон колебания скорости



Фиг. 208. Изменение скорости шунтового двигателя при ударной нагрузке для разных параметров.

представлен на фиг. 208А. Допустим, что мы уменьшим сопротивление R при неизменном значении двух других указанных параметров. При этом, как видно из (373), статическое падение скорости Δn_s уменьшится.

Так как $IR = U - E = k_2 n_0 - k_2 n$, то при уменьшении R для достижения того же тока необходимо меньшее динамическое падение скорости. Следовательно, уменьшение R действует на динамическое снижение скорости благоприятно. Однако вследствие уменьшения потерь затухание будет происходить более медленно, а частота колебаний увеличится (фиг. 208В).

Величина коэффициента самоиндукции L совершенно не оказывает влияния на статическое падение скорости. При неизменных других параметрах с уменьшением L (фиг. 208С) амплитуда колебаний и частота колебаний увеличиваются, но затухание происходит быстрее.

Изменение махового момента не оказывает влияния на статическое падение скорости, но увеличение его уменьшает естественно динамическое падение при одновременном уменьшении частоты колебаний (фиг. 208D), так как максимальное падение скорости получается в тот момент, когда амплитуда колебаний уже будет уменьшена затуханием.

Что же касается кривой тока, то ни L , ни R при данном GD^2 никакого влияния на установившееся значение тока не оказывают. Не очень существенно практически их влияние и на динамическую составляющую тока, почему мы рассмотрение этого влияния опускаем.

Краткие приведенные соображения показывают, что наименьшие колебания скорости будут у такого двигателя, у которого будут наименьшие R и L и наибольшее значение GD^2 . Эти условия дадут: 1) малую амплитуду; 2) большое затухание; 3) низкую частоту колебаний.

Общее рассмотрение вопросов устойчивости пунтового двигателя постоянного тока сделано акад. Никитиным и Куницким [Л. 121].

Невозможность осуществления подобных схем для экспериментального исследования на динамоэлектрическом заводе побудила инж. И. И. Стефановича [Л. 117] предложить эквивалентную схему из емкостей, сопротивлений и самоиндукций, которая может воспроизвести те же явления, что в действительном производственном агрегате с большим числом двигателей. При этом эквивалентом махового момента является емкость, эквивалентом нагрузки — некоторое добавочное сопротивление.

Заметим, что емкость C_3 , эквивалентная по действию влияния махового момента, может быть вычислена по формуле]

$$C_3 = \left(\frac{\pi}{60}\right)^2 \cdot \left(\frac{n}{E}\right)^2 \cdot GD^2 \text{ фарад,}$$

где E — э. д. с. в вольтах, индуктированная в обмотке якоря машины с независимым возбуждением при скорости n об/мин, а GD^2 — маховой момент электропривода в кгм².

67. Механические переходные режимы в электроприводе с серийными и компаундными двигателями постоянного тока при $M_m = \text{const}$ и $M_m = i(n)$

Как уже отмечено было выше, при рассмотрении механических характеристик серийного двигателя (п. 34), последние аналитически представлены быть не могут, а могут быть выражены лишь графически. Отсюда следует, что для решения уравнений движения электропривода с серийными двигателями могут быть применены лишь методы приближенного интегрирования в форме метода малых конечных приращений или в форме принципа пропорций. Различные применявшиеся аналитические методы, основанные на подборе эмпирических коэффициентов для механических характеристик, ведут к громоздким выражениям и лишь усложняют практическое решение задачи [Л. 119]. Прежде чем переходить к применению графо-аналитического метода к серийной машине, коснемся кратко вопроса об электромеханической постоянной этого типа двигателя. Как уже отмечено выше (п. 34), механическая характеристика серийного двигателя могла бы быть разбита на три участка: 1) прямолинейный; 2) параболический; 3) гиперболический. Для этих зависимостей могло бы быть получено аналитическое решение уравнений движения электропривода. Однако получающиеся при этом зависимости настолько сложны и громоздки, что ими пользоваться практически нецелесообразно. Как кривые скорости, так и момента здесь уже для параболического

и гиперболического участков не имеют экспоненциального характера. Экспоненциальные функции входят в числитель и знаменатель получающихся выражений. Постоянные времени экспонент зависят от формы механической характеристики и от величины и характера изменения статического момента.

Отсюда следует, что приведенное выше выражение электромеханической постоянной $B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot s_N \cdot a$ относится лишь к ма-

шине с шунтовой характеристикой. К тому же самое понятие „скольжения“ применительно к серийному двигателю становится весьма условным. Поэтому совершенно необходимым является сохранение в теории электропривода другой выше упомянутой постоянной, названной нами выше постоянной пуска и равной

$$B_p = \frac{GD^2 \cdot n_N}{375 \cdot M_N}.$$

Эта постоянная в большинстве случаев может практически характеризовать длительность, протекание отдельных механических переходных процессов.

Нужно отметить, что „постоянная пуска“ самих двигателей разной мощности мало зависит от их мощности.

Так в двигателях КПД открытых и закрытых эта постоянная варьирует в пределах 0,28—0,48 сек., повыщаясь с увеличением мощности. В машинах постоянного тока единой союзной серии типа МП постоянная лежит в пределах 0,4—0,6 сек. В крановых асинхронных двигателях типа КТ она варьирует от 0,22 до 0,43 сек., для типа КТО от 0,17—0,33 сек. В асинхронных машинах типа МА постоянная меняется от 0,4 до 0,6 сек.

Механические характеристики компаундных двигателей постоянного тока так же, как и серийных двигателей, не поддаются простому аналитическому выражению. Поэтому для компаундных двигателей также необходимо применение приближенных методов интегрирования. Поскольку пользование ими для компаундных двигателей никаких особенностей по сравнению с серийными не имеет, то мы рассматривать отдельно механические переходные режимы для компаундных двигателей здесь не будем. Методика решения задач для серийных двигателей полностью применима и к компаундным.

Во избежание повторений совершенно аналогичных выкладок и построений мы ограничимся рассмотрением лишь трех классов нагрузочных диаграмм и переходных режимов: 1) $M_m = \text{const}$; 2) $M_m = f(L)$; 3) $M_m = f(v, L)$. Диаграммы $M_m = f(L)$ являются частным случаем диаграмм $M_m = f(v, L)$. Графический или графо-аналитический метод решения задач при $M_m = f(t)$ таков же, как и при шунтовых двигателях.

Общая методика приближенного интегрирования в случае электропривода с серийными и компаундными двигателями в

основном будет оставаться примерно одинаковой независимо от того, будет ли $M_m = \text{const}$ или $M_m = f(v)$ или $M_m = \varphi(L)$ и т. д.

Нужно иметь в виду, что повышение нумерации класса нагрузочных диаграмм (от I до V) вообще вызывает усложнение расчетов или графических построений.

Прежде всего отметим, что в практике электропривода с сериесными и компаундными двигателями весьма часто используют по отдельным участкам чисто аналитическое интегрирование по методу, описанному нами в п. 26. Этот метод применим тогда, когда на определенном участке работы электропривода динамический момент может быть принят изменяющимся прямолинейно в функции скорости. Если в пределах изменений скорости от n_x до n_y динамический момент изменяется по закону прямой линии от M_x до M_y , то время переходного режима от n_x до n_y может быть найдено по формуле (см. стр. 143)

$$t_{xy} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{(n_y - n_x)}{(M_{jx} - M_{jy})} \cdot \ln \cdot \frac{M_{jx}}{M_{jy}} \quad (121')$$

или, выражая скорости вращения и моменты в %,

$$t_{xy} = \frac{GD^2}{375} \frac{n_N}{M_N} \cdot \frac{(n_y\% - n_x\%)}{(M_{jx}\% - M_{jy}\%)} \cdot \ln \frac{M_{jx}\%}{M_{jy}\%}$$

Соответственно путь, проходимый органами рабочей машины за время t_{xy} , выраженный в оборотах двигателя, будет

$$N_{xy} = \frac{GD^2}{22500} \cdot \frac{n_y - n_x}{M_{jx} - M_{jy}} \times \left[\left(\frac{n_y - n_x}{M_{jx} - M_{jy}} \cdot M_{jx} + n_x \right) \cdot \ln \frac{M_{jx}}{M_{jy}} - (n_y - n_x) \right] \quad (124)$$

Если обозначить через γ величину

$$\gamma = \frac{n_y - n_x}{M_{jx} - M_{jy}},$$

то

$$N_{xy} = \frac{GD^2}{22500} \cdot \gamma \left[(\gamma \cdot M_{jx} + n_x) \cdot \ln \frac{M_{jx}}{M_{jy}} - (n_y - n_x) \right]$$

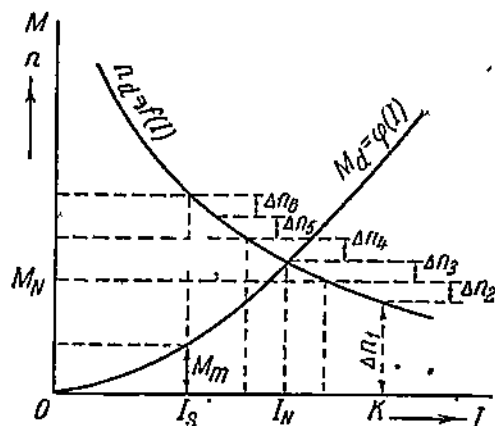
Или выражая скорости и моменты в % и обозначая

$$\gamma' = \frac{n_y\% - n_x\%}{M_{jx}\% - M_{jy}\%},$$

получим

$$N_{xy} = \frac{GD^2}{22500} \cdot \frac{n_N^2}{M_N} \cdot \gamma' \left[(\gamma' \cdot M_{jx}\% + n_x\%) \cdot \ln \frac{M_{jx}\%}{M_{jy}\%} - (n_y\% - n_x\%) \right]$$

Не менее часто для электроприводов с серийными и компаундными двигателями используют графо-аналитический метод малых конечных приращений. Соответствующие расчеты сосредоточены далее в табл. XII. Мы разберем сначала здесь простейший



Фиг. 209. Графо-аналитическое интегрирование уравнения движения привода для пуска серийного двигателя.

случай интегрирования для случая пуска при $M_m = \text{const}$. Графическое построение, необходимое для нахождения $M_d = f(I)$, $I_d = \varphi(I)$ и $n_d = \psi(I)$, выполнено на фиг. 209. На нем нанесены — механическая характеристика двигателя $n_d = f(I)$, зависимость момента двигателя от тока $M_d = \varphi(I)$ и показана величина $M_m = \text{const}$.

Рассмотрим работу двигателя от $n=0$ до установившейся скорости. Методика определения поведения двигателя при переходе от M_{m1} к M_{m2} остается той же самой.

Используя приближенное интегрирование уравнения движения привода, мы пишем его в виде

$$M_d - M_m = J \cdot \frac{\Delta \omega}{\Delta t}.$$

Преобразуем это равенство, написав его в форме

$$\Delta t = \frac{J}{M_d - M_m} \cdot \Delta \omega = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{\Delta n}{M_d - M_m}. \quad (388)$$

Пользуясь этим уравнением и задаваясь приращениями Δn , мы будем находить элементарный промежуток времени Δt , соответствующий принятым нами приращениям Δn .

На каждом участке M_d (а при переменном значении статического момента M_m и этот M_m) мы принимаем постоянным и равным среднему значению за рассматриваемое время.

Разобьем весь разгон двигателя на шесть участков: 1) первый участок — пуск двигателя под реостатом при постоянном среднем пусковом значении момента двигателя $M_d = a \cdot M_N$; 2) следующие пять участков — работа двигателя на естественной автоматической характеристике. На участки разбиваем, принимая равные приращения скорости $\Delta n_1 = \Delta n_2 = \Delta n_3 = \dots = \Delta n_5$. На каждом из этих участков принимаем среднее значение момента двигателя M_{dx} , где x — номер участка.

Вычислим Δt_1 . При пуске под реостатом, т. е. на первом участке, $M_d = a \cdot M_N$. Скорость на этом участке растет по закону

прямой линии, ускорение постоянно. Приращение скорости на первом участке равно $\Delta n_1 = n_1 - 0$. Если GD^2 — приведенный маховой момент привода, то время, которое потребуется до достижения двигателем скорости n_1 , будет

$$\Delta t_1 = \frac{GD^2}{375(\alpha M_N - M_m)} \cdot \Delta n_1.$$

Если нас интересует путь, пройденный механизмом, то он может быть найден по средней скорости и времени соответствующего участка.

Путь, выраженный в оборотах двигателя,

$$\Delta N_1 = \frac{\Delta n_1 + 0}{2} \cdot \Delta t_1.$$

Путь какой-либо точки механизма с диаметром D в метрах и передаточном числе от двигателя к механизму k :

$$\Delta L_1 = \Delta N_1 \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{\pi D}{60} = \frac{\Delta n_1 + 0}{2} \cdot \frac{GD^2 \cdot \Delta n_1}{375(\alpha M_N - M_m)} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{\pi D}{60}. \quad (389)$$

Нагревание двигателя за то же время будет характеризоваться величиной $I_1^2 t_1$ или

$$\Delta A_1 = I_1^2 \frac{GD^2}{375(\alpha M_N - M_m)} \cdot \Delta n_1. \quad (390)$$

Так будут найдены все необходимые величины для первого участка.

Переходим ко второму участку. На этом участке приращение скорости равно Δn_2 . Средний ток I_2 , среднее значение момента двигателя — M_{d2} . Отсюда находим

$$\Delta t_2 = \frac{GD^2}{375(M_{d2} - M_m)} \cdot \Delta n_2,$$

$$\Delta N_2 = \frac{\Delta n_1 + \Delta n_2}{2} \cdot \Delta t_2.$$

Общий пройденный путь, выраженный числом оборотов двигателя

$$\Delta N_{12} = \Delta N_1 + \Delta N_2;$$

выраженный же в метрах для той точки механизма, для которой мы подсчитываем, он равен

$$\Delta L_{12} = \Delta L_1 + \Delta L_2,$$

$$\Delta L_2 = \Delta N_2 \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{\pi D}{60}.$$

Нагревание двигателя за период Δt_2 характеризуется величиной

$$\Delta A_2 = I_2^2 \cdot \frac{GD^2}{375(M_{d2} - M_m)} \cdot \Delta n_2.$$

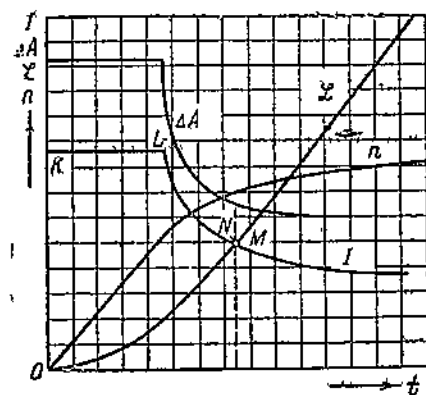
Нагревание двигателя за период $(\Delta t_1 + \Delta t_2)$ характеризуется величиной $\Delta A_1 + \Delta A_2 = \Delta A_{12}$. Переходим к третьему участку и т. д. до тех пор, пока не дойдем до последнего участка, в конце которого $M_d = M_m$.

Все производимые вычисления удобно представить в нижеследующей табл. XII.

На основании вычислений, приведенных в таблице, мы можем построить кривые фиг. 210, т. е. зависимости

$$n_d = \varphi(t), \quad I_d = f(t), \quad \Delta A = \psi(t) \quad \text{и} \\ L = f(t).$$

Положим, что серийный двигатель работает в кратковременном режиме длительностью T_k при длительности пуска t_p при токе, соответствующем статическому



Фиг. 210. Кривые I , n , L , ΔA для пуска электропривода с серийными двигателями.

Подсчет нагрузочных диаграмм серии

Период	Число оборотов двигателя за рассматриваемый период			Средний момент двигателя kgm	Статический момент M_m	Динамический момент $M_d = M_d - M_m$	Ускорение $1/\text{сек}^2$	
	Средний ток двигателя I	Минимум	Максимум					Среднее
1	I_1	0	Δn_1	$\frac{\Delta n_1 + 0}{2}$	αM_N	M_m	$\alpha M_N - M_m$	$\frac{375}{GD^2} (\alpha M_N - M_m)$
2	I_2	Δn_1	$\Delta n_1 + \Delta n_2$	$\frac{\Delta n_1 + \Delta n_2}{2}$	M_2	M_m	$M_2 - M_m$	$\frac{375}{GD^2} (M_2 - M_m)$
3	I_3	n_2	n_3	$\frac{n_2 + n_3}{2}$	M_3	M_m	$M_3 - M_m$	$\frac{GD^2}{375} (M_3 - M_m)$
4	I_4	n_3	n_4	$\frac{n_3 + n_4}{2}$	M_4	M_m	$M_4 - M_m$	$\frac{GD^2}{375} (M_4 - M_m)$
5	I_5	n_4	n_5	$\frac{n_4 + n_5}{2}$	M_5	M_m	$M_5 - M_m$	$\frac{GD^2}{375} (M_5 - M_m)$
6	I_6	n_5	n_6	$\frac{n_5 + n_6}{2}$	M_6	M_m	$M_6 - M_m$	$\frac{GD^2}{375} (M_6 - M_m)$

моменту, I_s . Остановку привода примем путем самоторможения вне времени t_k . Тогда эквивалентный ток двигателя

$$I_s = \sqrt{\frac{\Delta A_1 + \Delta A_2 + \dots + \Delta A_b + I_s^2 (t_k - t_p)}{t_k}}, \quad (391)$$

Методика нахождения мощности двигателя в данном случае по методу эквивалентного тока сводится к следующему. На основании подсчетов статической нагрузки механизма находим предварительную (номинальную) мощность двигателя

$$P'_N = \frac{F_m \cdot v}{102 \cdot \eta_p},$$

где F_m — статическое усилие механизма при нормальной скорости v , а η_p — к. п. д. передач. В случае повторно-кратковременного режима с очень большим числом пусков в час эта мощность должна быть повышена в 1,5—1,75 раза, а иногда и выше для учета нагрева при пуске и торможении. Исходя из P'_N , обращаемся к прейскуранту и подбираем соответствующий двигатель нуж-

Таблица XII

есного двигателя постоянного тока

Время в сек		Путь двигателя, выраженный числом оборотов	Путь органа механизма в м		Нагрев двигателя в A^2 сек	
За рассматриваемый период	Полное от начала пуска		За рассматриваемый период	Полный путь	За рассматриваемый период	За все время
Δt_1	Δt_1	ΔN_1	ΔL_1	ΔL_1	ΔA_1	ΔA_1
Δt_2	$\Delta t_1 + \Delta t_2$	ΔN_2	ΔL_2	$\Delta L_1 + \Delta L_2$	ΔA_2	$\Delta A_1 + \Delta A_2$
Δt_3	$\Delta t_1 + \dots + \Delta t_3$	ΔN_3	ΔL_3	$\Delta L_1 + \dots + \Delta L_3$	ΔA_3	$\Delta A_1 + \dots + \Delta A_3$
Δt_4	$\Delta t_1 + \dots + \Delta t_4$	ΔN_4	ΔL_4	$\Delta L_1 + \dots + \Delta L_4$	ΔA_4	$\Delta A_1 + \dots + \Delta A_4$
Δt_5	$\Delta t_1 + \dots + \Delta t_5$	ΔN_5	ΔL_5	$\Delta L_1 + \dots + \Delta L_5$	ΔA_5	$\Delta A_1 + \dots + \Delta A_5$
Δt_6	$\Delta t_1 + \dots + \Delta t_6$	ΔN_6	ΔL_6	$\Delta L_1 + \dots + \Delta L_6$	ΔA_6	$\Delta A_1 + \dots + \Delta A_6$

ной мощности и нужной скорости. При этом необходимо выбрать наивыгоднейшее передаточное число с точки зрения максимальной производительности, т. е. ускорения операций (п 29).

Выбрав предварительно двигатель, берем из прейскуранта его характеристики и по ним производим расчет, приведенный в табл. XII. В результате расчета получаем эквивалентный ток I_b . Этот ток должен быть равен номинальному току двигателя I_N . Если $I_N < I_b$, то выбранный двигатель по мощности мал; если $I_N > I_b$, то двигатель не будет достаточно использован в термическом отношении. Нужно взять ближайшие типы двигателей, с ними проделать снова полный расчет и так до примерного совпадения I_b и I_N . Понятно, что во всех случаях двигатель должен быть проверен на перегрузку.

Из изложенного видно, что для окончательного выбора мощности серийного двигателя требуется ряд пересчетов для разных двигателей, причем каждый пересчет требует составления приведенной ранее таблицы. Количество необходимых пересчетов сильно увеличивается благодаря тому, что в целях ускорения производственных операций необходимо проделать ряд вариантов с различными передаточными числами.

Эти вычисления можно упростить, если применить метод относительных единиц. Этот метод может быть использован во всех тех случаях, где определенная серия серийных (или компаундных) двигателей обладает одной и той же универсальной характеристикой. Так, вся серия американских серийных двигателей постоянного тока металлургического типа (МД) имеет одну и ту же универсальную характеристику, т. е. одна кривая $n=f(I)$, выраженная в относительных единицах, оказывается справедливой для всех двигателей серии без исключения. Наши двигатели типа КПД завода „Динамо“ также укладываются в одну характеристику.

Из равенства (388) видно, что характер ускорения электропривода в основном зависит от характера изменения M_d в зависимости от Δn . Если в целой серии двигателей кривая $M_d=f(n)$, выраженная в относительных единицах, остается той же самой, то будет одинаковой и степень ускорения. Для отдельных приводов будет меняться лишь масштаб отдельных величин. Это дает нам возможность для такой серии произвести расчет один раз с тем, чтобы полученные по этому расчету результаты применять для всех приводов с двигателями соответствующей серии с любыми GD^2 , но с тем характером изменения M_m , который принят в этом расчете.

Рассмотрим выражения для Δt (388). Выразим в нем Δn , M_d и M_m в относительных единицах. Обозначим n в относительных единицах через ν , а M —в относительных единицах через μ . При этом $\frac{M_m}{M_N} = \mu_s$.

Тогда Δt можно написать в форме:

$$\Delta t = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{\Delta n}{M_d - M_m} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_N}{M_N} \cdot \frac{\nu}{\mu_d - \mu_s}. \quad (392)$$

Величина $\frac{\gamma}{\mu_d - \mu_s}$ представляет время в относительных единицах, остающееся одинаковым для всех двигателей с одинаковой универсальной характеристикой при заданном характере. Обозначим время в относительных единицах через τ . В таком случае

$$\tau = \frac{\gamma}{\mu_d - \mu_s}. \quad (393)$$

Величина $\frac{GD^3}{375} \cdot \frac{n_N}{M_N}$ представляет масштаб времени для разных электроприводов. Так же, как мы от равенства (388) перешли к (392), можно выразить в относительных единицах и другие интересующие нас величины—путь и коэффициент, характеризующий нагрев. Так

$$\Delta N_k = \frac{GD^3 \cdot \Delta n_k}{375(M_{dk} - M_m)} n_{кр} = \frac{GD^3}{375} \cdot \frac{n_N^2}{M_N} \cdot \frac{\Delta v_k \cdot v_k}{\mu_{dk} - \mu_s}. \quad (394)$$

Путь, выраженный числом оборотов двигателя в относительных единицах:

$$\Delta N = \frac{\Delta v_k \cdot v_k}{\mu_{dk} - \mu_s}. \quad (395)$$

Масштабом в данном случае будет величина $\frac{GD^3}{375} \cdot \frac{n_N^2}{M_N}$.

Соответственно

$$\Delta A_k = I_k^2 \cdot \frac{GD^3}{375(M_{dk} - M_m)} \Delta n_k = I_N^2 \cdot \frac{GD^3 \cdot n_N}{375 M_N} \cdot \frac{i^2 \psi \cdot \gamma}{(\mu_{dk} - \mu_s)}, \quad (396)$$

где i_ψ —ток в относительных единицах и

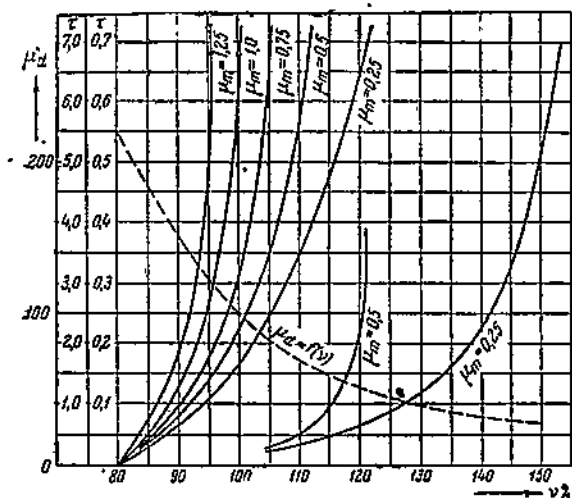
$$\alpha_k = \frac{i^2 \psi \cdot \gamma}{\mu_{dk} - \mu_s} \quad (397)$$

будут $A^2 \cdot \text{сес}$, выраженные в относительных единицах. Опирируя с характеристикой (двигателя) в относительных единицах и равенствами (392), (394) и (396), мы можем составить табл. XIII, но уже в относительных единицах.

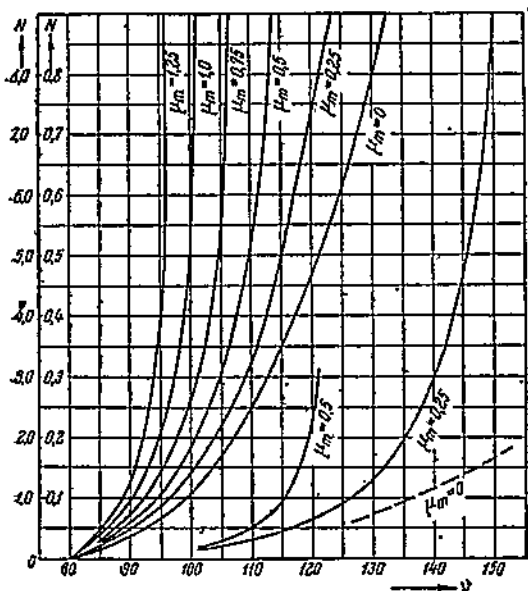
Таблица XIII

Подсчет времени пуска электропривода с серийными двигателями типа КПД в относительных единицах для трех разных статических моментов

№ по пор.	Число об/мин двигателя за рассмотренный период			Средний момент двигателя	Статический момент	Время в относительных единицах		
	v_{\min}	v_{\max}	$\frac{v_{\min} + v_{\max}}{2}$			$\tau = \frac{\gamma}{\mu_d - \mu_m}$	$\mu_m = 1,00$	$\mu_m = 0,5$
1	0	0,82	0,41	2	3 варианта $\mu_m = 1,0$ $\mu_m = 0,5$ $\mu_m = 0,25$	0,41	0,274	0,234
2	0,82	0,84	0,83	1,9		0,92	0,594	0,51
3	0,84	0,85	0,845	1,7		1,21	0,71	0,58
4	0,85	0,88	0,865	1,5		1,74	0,87	0,70
5	0,88	0,94	0,91	1,3		3,04	1,14	0,87
6	0,94	1,00	0,97	1,1		9,7	1,64	1,14
7	1,00	1,10	1,05	0,9		—	2,63	1,62
8	1,10	1,28	1,19	0,7		—	5,92	2,65



Фиг. 211. Кривые скорости в относительных единицах.



Фиг. 212. Кривые пути в относительных единицах.

теля маховой момент электропривода $GD^2 = 5 \text{ kgm}^2$.

Определим интересующие нас величины (время, путь, $A^3 \text{ sec}$) за время разгона двигателя по естественной характеристике от $v = 0,8$ до установившейся скорости.

В табл. XIII подсчитано лишь время в относительных единицах для трех значений статического момента $\mu_m = 1,00$; $0,5$; $0,25$. С помощью равенств (395) и (397) можно было также подсчитать путь N и нагрев двигателя α в относительных единицах. Все эти расчеты дают нам возможность построить кривые $v = f(\tau)$; $N = f_1(\tau)$, $\alpha = f_2(\tau)$ в относительных единицах. На фиг. 211, 212 и 213 приведены кривые для условий разгона двигателя типа КПД по естественной характеристике от 80% нормальной скорости, т. е. от $v = 0,8$ для трех значений статического момента. Имея такие кривые, можно быстро решать практически задачи. Поясним это одним частным примером.

Положим, что имеет ся электропривод с двигателем КПД 110/734. Для этого двигателя $M_N = 18,5 \text{ kgm}$; $n_N = 950 \text{ об/мин}$; $I_N = 47 \text{ A}$. Статический момент механизма, приведенный к валу двигателя $M_m = 14 \text{ kgm}$. Приведенный к валу двига-

По характеристике двигателя находим, что при $M_d = M_m$ число оборотов двигателя в минуту будет равно 1 000 об/мин. Переходим к относительным единицам: $M_m : M_N = 14 : 18,5 = 0,75$. Стало быть, наш электропривод разгоняется при $M_m = 0,75 M_N$ до $\nu = 1,055$. Обращаемся к кривым фиг. 211—213. Из них по кривым, соответствующим $\mu_s = 0,75$, находим, что двигатель достигнет скорости $\nu = 1,055$ по истечении времени $\tau = 0,68$; за это время будет пройден путь $N = 0,68$; $A^2 \text{ sec}$, выраженные в относительных единицах, за то же время будут $a = 0,82$.

Умножая полученные величины на масштабы, находим время в секундах:

$$t_p = \frac{GD^2 \cdot n_N}{375 \cdot M_N} \cdot \tau. \quad (398)$$

Путь, выраженный числом оборотов двигателя,

$$N = \frac{GD^2 \cdot n_N^2}{375 \cdot M_N} \cdot N. \quad (399)$$

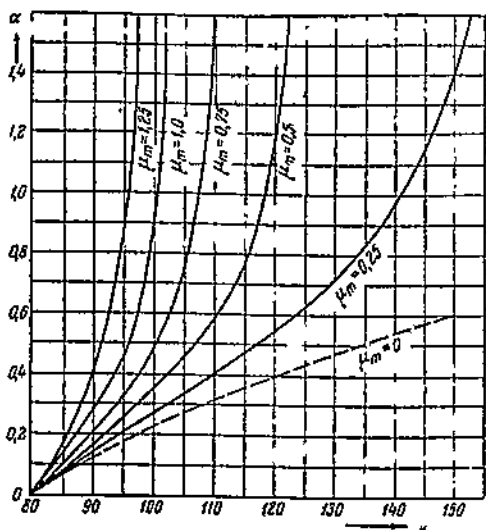
Здесь N —путь в относительных единицах.

Нагрев в $A^2 \text{ sec}$:

$$A = \frac{GD^3 \cdot n_N \cdot P_N}{375 \cdot M_N} \cdot a. \quad (400)$$

Очевидно, что метод относительных единиц может быть применен также при $M_m = c \cdot n$, при $M_m = c'n^2$ и при $M_m = c'' \cdot \frac{1}{n}$.

Приведенный выше расчет сделан лишь для естественной характеристики. Для искусственных характеристик принимается постоянное значение $\mu_d = \mu_N \cdot \gamma$. Расчет может быть уточнен тем, что каждая пусковая характеристика разбивается на ряд участков и для нее производятся такие же расчеты, как и для естественной. Однако практически такое уточнение нормально не требуется.



Фиг. 213. Кривые коэффициента нагрева в относительных единицах.

¹ При этом для каждого значения c необходимы свои кривые.

Мы не приводим здесь рассмотрения расчета для тормозных режимов серийного двигателя — противовключения и динамического. Расчет для этих характеристик ведется тем же путем. Необходимо лишь правильно учитывать знаки статического и тормозного моментов. Тормозные режимы естественно также могут быть рассчитаны методом относительных единиц.

68. Механические переходные режимы электропривода с серийными двигателями при $M_m = f(L)$

Решение задач о переходных режимах и нагрузочных диаграммах электропривода с серийными и компаундными двигателями с $M_m = f(L)$ аналитически выполнено быть не может в силу того, что механическая характеристика этих двигателей не поддается аналитическому выражению. Кроме того весьма часто не удается выразить аналитически и кривую $M_m = f(L)$. Поэтому решение рассматриваемых задач производится приближенными способами графического интегрирования по участкам, при этом используется или графо-аналитический способ элементарных приращений или принцип пропорций.



Фиг. 214. Замена кривой $M_m = f(L)$ эквивалентной ломаной линией.

Однако применение этих методов при $M_m = f(L)$ имеет некоторые особенности по сравнению с использованием их при $M_m = \text{const}$. Для решения уравнения движения привода по участкам мы должны кривую $M_m = f(L)$ заменить эквивалентной ломаной линией с постоянными значениями M_m на отдельных участках (фиг. 214). То же самое мы должны сделать и в отношении кривой M_d . Далее необходимо аналитически или графически произвести вычисление или построение по равенству

$$\frac{M_{dmx} - M_{mnx}}{J} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t},$$

где M_{dmx} и M_{mnx} — соответственно средние значения моментов двигателя и статического за рассматриваемый участок.

Однако в отличие от рассмотренных ранее случаев этот подсчет нуждается в последующей, иногда неоднократной, проверке построением (или вычислением), кроме кривой $\omega = f(t)$, также кривой $L = \varphi(t)$. Деление M_m по участкам производится до некоторой степени случайно. В самом деле, принимая для какого-то участка среднее значение M_{mnx} , мы не можем выбрать приращение скорости $\Delta\omega_x$ так, чтобы за получаемое нами по расчету время Δt_x электропривод прошел именно намеченный нами путь ΔL_x . Получив

Δt_x и вычислив далее путь за этот промежуток времени, мы получим обычно $\Delta L'_x \neq \Delta L_x$. Следовательно, в проведенный нами расчет нужно внести корректив, подставив среднее значение статического момента $M_{m_{mx}}$, соответствующее $\Delta L'_x$, а не ΔL_x . С новым значением статического момента расчет должен быть проделан вновь, и так до совпадения исходной и получаемой величины M_m . Практически двойной пересчет дает обычно уже достаточную точность.

Само приближенное интегрирование обычно может проделываться по методу конечных приращений с использованием вариантов:

а) аналитическое интегрирование с принятием на определенном участке прямолинейного закона для динамического момента (п. 26 и 67);

б) графо-аналитическим способом (п. 67);

с) пользуясь принципом пропорций (п. 60).

Основы всех указанных способов изложены выше, а потому их повторять здесь мы не будем. Некоторые примеры рассмотрены в [Л. 120 — 121].

Наиболее важную категорию исполнительных механизмов с $M_m = f(L)$ представляют различные кривошипные механизмы с переменным маховым моментом (п. 25). Поэтому прежде чем давать иллюстрацию рассматриваемого класса диаграмм, мы разберем особенности решения уравнения движения привода при $M_m = f(L)$ и $GD^2 = \text{var}$.

69. Особенности расчета нагрузочных диаграмм и переходных режимов при переменном маховом моменте

Выше в отделе динамики электропривода был приведен вид уравнения движения электропривода при переменном приведенном маховом моменте

$$\pm M_d \pm M_m = J(\alpha) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{d \cdot J(\alpha)}{d\alpha} \cdot \frac{\omega^2}{2}. \quad (63)$$

Аналитическое решение уравнения этого вида для практических случаев с $M_m = f(L)$ невозможно даже для электропривода с шунтовой характеристикой, не говоря уже о серийной и компандной характеристиках. Поэтому его решение должно производиться исключительно графо-аналитическим методом.

Решение этой задачи может быть выполнено различными способами.

Один из способов заключается в применении последовательного подбора. Решая уравнение движения привода методом конечных разностей, мы на определенном участке пути берем среднее значение статического момента $M_{m_{mx}}$. Для того же участка пути необходимо взять и среднее значение махового момента.

В начале участка живая сила системы

$$A_1 = \frac{J_1 \cdot \omega_1^2}{2}.$$

В конце участка живая сила будет равна

$$A_2 = \frac{J_2 \cdot \omega_2^2}{2} = \frac{(J_1 + \Delta J) \omega_2^2}{2}.$$

Эквивалентный по живой силе для этого участка момент инерции может быть найден из равенства

$$\left. \begin{aligned} \frac{J_x(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2} &= \Delta A = \frac{J_1(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2} + \frac{\Delta J \cdot \omega_2^2}{2}, \\ J_x &= \frac{J_1(\omega_2^2 - \omega_1^2) + \Delta J \cdot \omega_2^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} = J_1 + \frac{\Delta J \cdot \omega_2^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}. \end{aligned} \right\} (401)$$

Определив J_x для участка по указанному равенству, можно для этого участка пользоваться уравнением движения привода в виде

$$\frac{M_d - M_{max}}{J_x} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

и решать его в соответствии с методикой, рассмотренной в предыдущем параграфе.

Куницким [Л. 20], Целиковым [Л. 48] и Ирошниковым [Л. 49] предложены три разных способа упрощенного решения уравнения движения привода в рассматриваемом случае.

Куницкий исходит из равенства (63)

$$M_j = J_{(\alpha)} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ_{(\alpha)}}{d\alpha} \cdot \frac{\omega^2}{2}. \quad (63)$$

Заменяя в нем $J_{(\alpha)}$ через $\frac{GD^2_{(\alpha)}}{4g}$ и подставляя $d\alpha = \omega \cdot dt$, получим

$$M_d \pm M_m = \frac{GD^2_{(\alpha)}}{375} \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{n}{750} \cdot \frac{d(GD^2_{(\alpha)})}{dt}. \quad (402)$$

Отсюда находится

$$dt = \frac{GD^2_{(\alpha)}}{375} \cdot \frac{dn}{(M_d \pm M_m)} + \frac{n \cdot d(GD^2_{(\alpha)})}{750 \cdot (M_d \pm M_m)}.$$

Переходя к малым элементарным приращениям, получим

$$\Delta t = \frac{GD^2_{(\alpha)}}{375} \cdot \frac{\Delta n}{(M_d \pm M_m)_m} + \frac{n}{750} \cdot \frac{\Delta(GD^2_{(\alpha)})}{(M_d \pm M_m)_m}. \quad (403)$$

Приращение угла поворота кривошипа в градусах $\Delta \alpha$ может быть выражено равенством

$$\Delta \alpha \cdot \frac{\pi}{180} \cdot k = \frac{\pi \cdot n_m}{30} \cdot \Delta t,$$

где k — передаточное число между осью двигателя и осью кривошипа.

Откуда

$$\Delta \alpha = \frac{6 \cdot n_m}{k} \cdot \Delta t. \quad (404)$$

Задаваясь Δt , мы по равенству (404) можем найти $\Delta \alpha$.

Так как при расчете Δn нам неизвестно, а стало быть неизвестно и n_m , то при расчете необходимо идти методом последовательного подбора, как и в предыдущем случае.

Задачу нахождения Δn Куининий разрешает следующим способом. Так как

$$n_m = \frac{2n_1 \pm \Delta n}{2},$$

то согласно (434)

$$\Delta \alpha = \frac{6n_1 \cdot \Delta t \pm 3 \cdot \Delta n \cdot \Delta t}{k}. \quad (405)$$

Пренебрегая в (405) вторым членом, он получает

$$\Delta \alpha = \frac{6n_1 \cdot \Delta t}{k}. \quad (406)$$

Принимая прямолинейное изменение момента двигателя для любого рассматриваемого участка, получаем

$$M_{dm} = \frac{M_1 + M_2}{2} = M_{d1} + \frac{\Delta M_d}{2},$$

где M_{d1} и M_{d2} — соответственно значения момента в начале и конце участка. Из фиг. 215 следует, что

$$\Delta M_d = \Delta n \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

или

$$M_m = M_{d1} \mp \frac{\Delta n \cdot \operatorname{tg} \varphi}{2}. \quad (407)$$

Подставляя (403) и (407) в (406) и принимая $n_m = n_1$, получаем

$$\Delta \alpha = \frac{6n_1}{k} \left[\frac{GD^2_{(\alpha)} \Delta n}{375 \left(M_1 \mp \frac{\Delta n \cdot \operatorname{tg} \varphi}{2} \mp M_m \right)} + \frac{n_1 \cdot \Delta GD^2_{(\alpha)}}{750 \left(M_1 \mp \frac{\Delta n \cdot \operatorname{tg} \varphi}{2} \mp M_m \right)} \right].$$

Отсюда

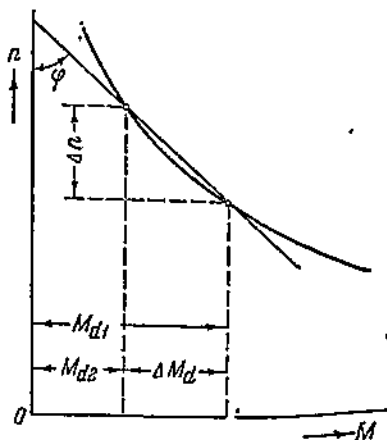
$$\Delta n = \frac{250 \cdot \Delta \alpha \cdot k \cdot (M_1 \pm M_m) - 2n_1^3 \cdot \Delta GD^2_{(\alpha)}}{4n_1 (GD^3_{(\alpha)}) \pm 125 \cdot \Delta \alpha \cdot k \cdot \operatorname{tg} \varphi}. \quad (408)$$

Очевидно, что в формуле (408) величина $\operatorname{tg} \varphi$ для серийных и компаундных двигателей по мере перехода от участка к участку меняется. Она остается постоянной лишь для шунтовых двигателей.

Уравнение (408) служит для определения Δn , исходя из выбора $\Delta \alpha$, $GD^2_{(\alpha)}$, $\Delta GD^2_{(\alpha)}$, M_1 и n_1 .

Относительная погрешность формулы (408) равняется

$$\lambda = \frac{\pm 3 \cdot \Delta n}{6n_1 \pm 3 \Delta n} = \frac{\pm 1}{\frac{2n_1}{\Delta n} \pm 1}.$$



Фиг. 215. Замена кривой момента двигателя отрезками прямых.

Поэтому автор рекомендует при уменьшении числа оборотов в минуту переходить к более мелким участкам, выбираемым так, чтобы величина $\frac{2n_1}{\Delta n}$ оставалась неизменной.

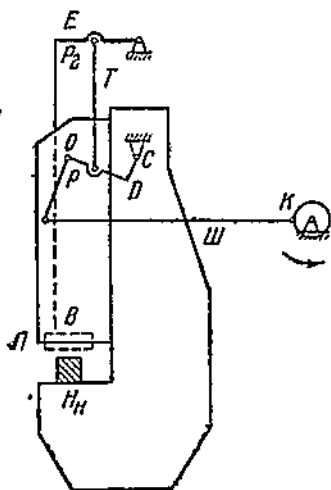
Обычно при этом методе повторного расчета угла $\Delta\alpha$ не требуется. Равенство (408) дает возможность найти $\Delta n_1, n_2 = n_1 \pm \Delta n_1$, а по ним M_2 и I_2 . Промежутки времени находятся по формуле (406).

Расчет для следующих участков аналогичен.

Нужно отметить, что приведенный метод дает большую погрешность при малых числах оборотов в минуту и крупных участках. В этом случае целесообразнее применять метод последовательного подбора.

70. Нагрузочная диаграмма электропривода с сериесным двигателем для $M_m = f(L)$ на примере ножниц с пуском для каждого реза

В качестве примера нагрузочной диаграммы привода с сериесным двигателем при $M_m = f(L)$ мы возьмем безмаховиковые ножницы, пускаемые для каждого отдельного реза. Подобные ножницы, как безмаховиковые и с частыми пусками, требуют вообще при резке металла определенного сечения большей мощности двигателя, чем ножницы с непрерывным вращением с маховиком (п. 63). Однако простота конструкции и большая надежность этих ножниц вызвали их широкое распространение за последние годы. Такие ножницы установлены у нас на Кузнецком, Магнитогорском, Макеевском и Златоустовском заводах. Закон изменения приведенного статического момента и приведенного махового момента был дан выше в п. 25. Он представлен также далее на фиг. 218.



Фиг. 216. Кинематическая схема безмаховиковых ножниц.

Кинематическая схема ножниц с усилием в 900 т для резания прокатанных блюмингов слитков (блумсов) представлена на фиг. 216.

Электродвигатель через зубчатую передачу приводит во вращение кривошип K . Этот последний шатуном $Ш$ соединен с угловым рычагом P , который закреплен в точке O , связанной с суппортом верхнего ножа шарнирно. Второй конец рычага P через серьгу C соединен с суппортом нижнего ножа H_n . Рычаг P соединен с другим рычагом P_2 тягой T . Один конец рычага P_2 закреплен шарнирно в корпусе ножниц, второй же соединен с прижимом $П$. Работа ножниц протекает следующим образом. При вращении кривошипа $в$ начале под влиянием веса суппортов происходит опускание верхнего ножа и прижима. При этом рычаг P

поворачивается вокруг точки *Д*. Как только прижим коснется разрезаемого блумса, верхний нож и с ним шарнир *О* останавливаются. Далее происходит поворот рычага *Р* около точки *О*. В результате поднимается нижний нож, что и вызывает резание слитка при одновременном подъеме прижима.

По окончании резки сначала (при $180^\circ < \alpha < 360^\circ$) происходит опускание нижнего ножа с прижимом, а затем подъем верхнего ножа с прижимом.

Для электропривода таких ножниц оказывается более целесообразным применение серийных двигателей постоянного тока. Так у нас на рассматриваемых ножницах в 900 т применены два включенных нормально серийных двигателя типа КПД мощностью в 180 kW, $\zeta = 25\%$ 515 об/мин.

Применение на ножницах двух двигателей вместо одного было вызвано:

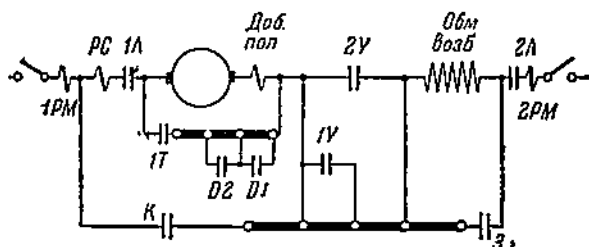
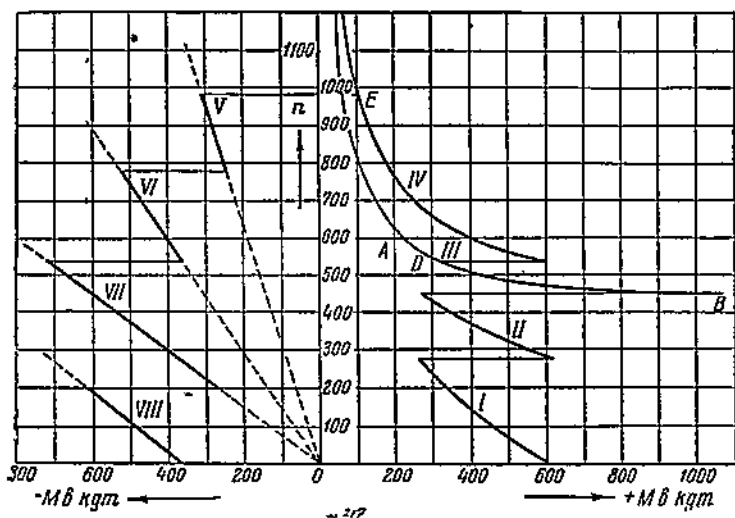
1) отсутствием в СССР двигателей типа КПД больших мощностей; 2) меньшим суммарным маховым моментом двух двигателей по сравнению с одним; 3) большей надежностью работы из-за возможности работать с одним двигателем при пониженной мощности.

Для привода Центрального промышленного отдела Электропрома была намечена серия механических характеристик, представленная на -фиг. 217.

Она предусматривает две пусковых искусственных характеристики *I* и *II*, естественную *III*, с шунтировкой обмотки возбуждения *IV*, три характеристики динамического торможения *V*, *VI* и *VII*. Последняя ступень *VIII* представляет торможение механическим тормозом. Принципиально схема двигателя с контакторами дана на той же фигуре.

Схема содержит два линейных контактора *1Л* и *2Л*, включающих двигатель на сеть. Для защиты двигателя применены два максимальных реле *1РМ* и *2РМ*. При замыкании *1Л* и *2Л* двигатель работает на *I* характеристике при дополнительном замыкании контактора ускорения *1У* на *II*, при последующем замыкании *2У* на характеристике *III*. Характеристика *IV* получается при шунтированной обмотке возбуждения и замкнутых контакторах *1Л*, *2Л*, *1У*, *2У* и *3У*. Динамическое торможение по характеристике *V* получается при замкнутых контакторах *2Л*, *К* и *1Т*, по характеристике *VI*—при замкнутых контакторах *2Л*, *К*, *1Т* и *Д1*, по характеристике *VII*—при замкнутых контакторах *2Л*, *К*, *1Т*, *Д1* и *Д2*. Переключение двигателем по характеристикам показано жирными линиями.

После включения на сеть двигатель проходит по характеристикам *I* и *II*, далее попадает на естественную. Двигатель разгоняется на ней примерно до точки *А*, когда при угле поворота кривошипа в 85° (в случае блумса 200×200 мм) начинается резание нижним ножом. Скорость двигателя при этом понижается до точки



Фиг. 217. Механические характеристики электродвигателя для привода ножниц.

В этой характеристике. При спадении нагрузки двигатель начинает снова ускоряться по естественной характеристике до точки *Д*, когда двигатель для более быстрого поворота кривошипа переключается на характеристику с шунтированной обмоткой возбуждения, по которой он достигает точки *Е*. После этого двигатель постепенно переключается и последовательно проходит характеристики динамического торможения и, наконец, чисто механического торможения.

Нагрузочные диаграммы электропривода и необходимые для него механические характеристики получаются в результате неоднократного расчета. Нагрузочные диаграммы подобного электропривода представлены на фиг. 218. На нем показан статический момент $M_m = f(\alpha)$, разделенный на ряд участков с $M_m = \text{const}$.

По принципу пропорций может быть построена кривая $n = f(t)$.

Построение ее производится с непрерывной проверкой пути, т. е. построением кривой $\alpha = f(t)$. Сама методика построения кри-

Имея кривые $I_d = \varphi(a)$ и $t = \psi'(a)$, можно построить зависимость $I_d = \psi(t)$ и к ней применить метод эквивалентного тока. Не представляет затруднений и нахождение с помощью механических характеристик двигателя и зависимости $M_d = f(t)$.

71. Нагрузочные диаграммы электропривода $M_m = f(v, L)$

Как отмечено ранее, типичным примером этой категории нагрузочных диаграмм переходных режимов является работа заводского электровоза, курсирующего между отдельными цехами на участках с уклонами и кривыми, например, отвоз шлака на металлургическом заводе, электровозы горных разработок и т. д. Подробным рассмотрением соответствующих электроприводов занимается электрическая тяга. Мы ограничимся здесь лишь кратким рассмотрением одного из методов решения соответствующих задач.

Сопротивление электровоза движению будет

$$F_m = F_t + c \cdot v^2 + F_g + F_k = F_{m1} + F_{m2}, \quad (409)$$

где F_t — сопротивление трению по рельсы, не зависящее от скорости; $c \cdot v^2$ — сопротивление трения состава о воздух; F_g — положительное сопротивление подъема или отрицательное сопротивление спуска, зависящее от профиля пути; F_k — добавочное сопротивление на кривых, также определяемое проходимыми путем. Таким образом статический момент такого электропривода имеет две составляющих

$$M_{m1} \equiv F_{m1} = (F_t + cv^2) = f(v),$$

$$M_{m2} \equiv F_{m2} = (F_g + F_k) = \psi(L).$$

Решение уравнения движения электропривода тем или иным способом должно дать нагрузочные диаграммы $n = f(t)$, $M_d = \varphi(t)$, $I_d = \psi(t)$.

Очевидно, что для расчета необходимо предварительно задаваться габаритом (мощностью) двигателя. Так как при этом зависимости $M_d = f'(\omega)$ и $I_d = \varphi'(\omega)$ известны, то задача сводится к вычислению кривых $n = f(t)$ и $L = \psi(t)$.

Решение уравнения движения привода в данном случае, как и при $M_m = f(L)$, может быть естественно выполнено лишь приближенным методом графо-аналитического интегрирования.

Поскольку $M_m = f(v, L)$, то, так же как и при $M_m = f(L)$, совершенно обязательным здесь является одновременное построение кривых $n = f(t)$ и $L = \psi(t)$ с последующими поправками. Ниже на фиг. 219 дано применение к случаю электропривода электровоза принципа пропорций.

На этом рисунке слева показана механическая характеристика двигателя $M_d = f(n)$ и одна составляющая статического момента M_{m1} , пропорциональная скорости.

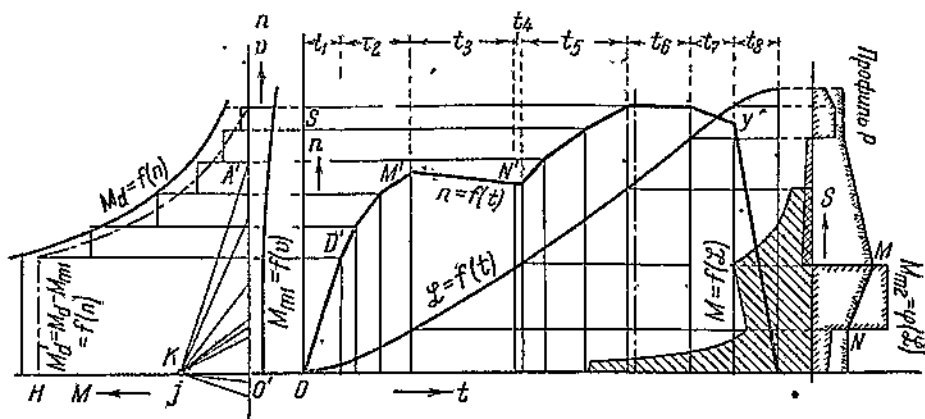
Поскольку эти две кривые являются функцией одной и той же переменной, то кривая M_{m1} сразу может быть вычтена из кривой M_d . Разность их показана на фиг. 219 слева пунктирной кривой. Так как этим вычитанием влияние скорости уже учтено, то далее расчет ведется так же, как и в случае электропривода с $M_m = f(L)$.

В правой части фигуры показан профиль пути P и вторая составляющая статического момента M_{m2} , зависящая от пути, т. е. соответствующая трению о рельсы, спускам, подъемам. Добавочные сопротивления на кривых в данном случае не учтены.

Построение кривых $n = f(t)$ и $L = \psi(t)$ по принципу пропорций проделано в средней части фигуры.

Слезы в соответствующем масштабе, обусловленном возможностью применения принципа пропорций, отложен J [п. 60].

Пунктирная кривая $M'_d = M_d - M_{m1}$ заменена ломаной линией с постоянными значениями M'_d на отдельных участках. Как и при $M_m = f(L)$ делится ориентировочно на отдельные участки и кривая M_{m2} .



Фиг. 219. Нагрузочная диаграмма электровоза.

Берем первый участок кривых с постоянными значениями моментов M'_{d1} и M'_{m2} , соответствующими пуску двигателя под реостатом. Находим динамический момент для этого участка $M_j = M'_{d1} - M'_{m2}$. Откладываем его по оси ординат ($M_j = O'A'$) и соединяем точку A' с точкой K ($O'K = J$).

Линия OD' определяет закон изменения скорости на первом участке согласно равенству

$$\frac{M_{d1} - M_{m2}}{J} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

Одновременно с использованием произвольного коэффициента R (п. 60) строятся для первого участка закон изменения L по равенству

$$\frac{\Delta \alpha}{\Delta t} = \frac{\omega}{R}, \quad \gamma \cdot \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta t} = \frac{\omega}{R}$$

В этом равенстве коэффициент γ характеризует соотношение линейного пути электровоза и углового пути электродвигателя.

Вычисленное значение ΔL сверяется с величиной $\Delta L'$, принятой вначале для подсчета при делении кривой на участки. Если $\Delta L'$ было принято больше или меньше, чем получилось при расчете, а стало быть среднее значение составляющей статического момента M'_{m2} , принятое при расчете, оказалось меньше или больше получившегося, то расчет должен быть проделан вновь для первого участка до совпадения исходной величины $\Delta L'$ и полученной ΔL . Обычно двухкратный расчет уже дает достаточное для практики совпадение. Аналогично должны быть проделаны расчеты для второго участка и т. д.

72. Графо-аналитические методы решения уравнений электромеханических переходных режимов в приводах с двигателями постоянного тока

Выше (п. 64) было дано чисто аналитическое решение уравнений электрических переходных режимов для случая $M_m = \text{const}$ для электропривода с шунтовым двигателем постоянного тока. Однако, это решение получено при двух допущениях, кроме других

предварительно принятых упрощений: 1) при пренебрежении переходными процессами в обмотке возбуждения; 2) при принятии значения коэффициента самоиндукции обмотки якоря постоянным. Только при указанных допущениях и возможно аналитическое решение уравнений электрических переходных режимов с шунтовым двигателем.

При переменном значении коэффициента самоиндукции якоря такое аналитическое решение из-за трудности учета насыщения оказывается невозможным, и при желании выяснить влияние этого фактора приходится прибегать к приближенному графо-аналитическому интегрированию уравнений переходных режимов. Поскольку изменение коэффициента самоиндукции якоря под влиянием насыщения обычно невелико, не очень значительно в шунтовой машине и влияние переходных токов в обмотке возбуждения, то для этого типа двигателя при $M_m = \text{const}$ часто удовлетворяются приведенным выше аналитическим решением. При $M_m = f(L)$ или $M_m = \varphi(\sigma, L)$ применение приближенных методов становится обязательным и в приводах с шунтовой машиной.

Еще сложнее обстоит дело в электроприводах с сериесными двигателями. Условия электрического и механического равновесия по внешнему виду остаются теми же, что и в шунтовой машине, а именно

$$U = IR + L \cdot \frac{dI}{dt} \pm \mathcal{H}_3 \cdot \omega, \quad (340)$$

$$M_d \pm M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (65)$$

Однако здесь величина L включает не только коэффициент самоиндукции обмотки якоря и добавочных полюсов, которые до некоторой степени могут быть приняты постоянными, но и сильно меняющийся коэффициент самоиндукции обмотки возбуждения, определяемый по кривой намагничивания. Аналитическое решение здесь возможно в той же форме, как и в шунтовой машине лишь по участкам, на каждом из которых мы принимаем неизменное значение коэффициента самоиндукции якорной цепи. Но такое решение до существу уже представляет как бы переход к нормальным методам приближенного интегрирования по отдельным участкам. Более общим способом решения уравнений электрических переходных режимов сериесной машины оказывается опять-таки тот или иной графо-аналитический приближенный метод. Аналитическое решение задачи для разных режимов шунтовой и сериесной машины с использованием операционного метода Хивисайда дано в кандидатской диссертации инж. Фрейдзоном (ЛЭГИ, 1938).

В случае электропривода с компаундным двигателем постоянного тока переходные режимы становятся еще более сложными вследствие влияния взаимной индукции между шунтовой и сериесной обмоткой. Здесь совершенно обязательно рассмотрение зако-

нов изменения тока в цепи возбуждения и учет влияния этого изменения на главную цепь. В результате для компаундного двигателя необходимо совместное решение трех уравнений:

1) уравнения электрического равновесия в главной цепи

$$U = \pm E + RI + (L_1 + L_2) \cdot \frac{dI}{dt} + (M - M_{nr}) \cdot \frac{di}{dt}; \quad (410)$$

2) уравнения электрического равновесия в цепи возбуждения

$$U = L_3 \cdot \frac{di}{dt} + ir + M \cdot \frac{dI}{dt}; \quad (411)$$

3) уравнения механического равновесия системы

$$\pm M_d \pm M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (65)$$

где L_1 , L_2 и L_3 — соответственно коэффициенты самоиндукции обмотки якоря, серийной и шунтовой обмоток возбуждения; M — коэффициент взаимной индукции шунтовой и серийной обмоток.

Коэффициент M_{nr} в (410) учитывает влияние реакции якоря.

Аналитическое решение приведенного семейства уравнений опять-таки возможно лишь по отдельным участкам, на каждом из которых можно принять соответствующие постоянные значения L_2 , M и магнитного потока двигателя Φ .

Конечное дифференциальное уравнение в этом случае будет третьего порядка и для тока имеет вид:

$$\frac{d^3 I}{dt^3} + \frac{(T_1 + T_2)}{\sigma \cdot T_1 T_2} \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{(T_2 + B)}{\sigma \cdot B \cdot T_1 T_2} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{1}{\sigma \cdot B \cdot T_1 T_2} \cdot I = \frac{I_s}{\sigma \cdot B \cdot T_1 T_2}, \quad (412)$$

где B — электромеханическая постоянная электропривода нормального вида для шунтовой машины; T_1 и T_2 — электромагнитные постоянные, соответственно равные

$$T_1 = \frac{L_1 + L_2}{R_1}; \quad T_2 = \frac{L_3}{R_3}$$

и σ — коэффициент рассеяния обмоток возбуждения, равный

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_2 L_3}.$$

Полное решение этого уравнения для тока будет иметь вид

$$I = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 \cdot e^{\alpha_2 t} + A_3 e^{\alpha_3 t} + I_x, \quad (413)$$

где α_1 , α_2 и α_3 — корни характеристического уравнения, определяемые по формулам Кардана, а I_x — частное решение (412). Виды полных решений для скорости n и тока возбуждения аналогичны

таковому для тока главной цепи, только будут иметь другие подинтегральные постоянные и свое частное решение,

Подробный разбор соответствующих вопросов можно найти в диссертации по переходным режимам компаундных двигателей инж. Полтавы [Л. 122].

Однако решения вида (413) справедливы опять-таки лишь для каждого отдельного участка с постоянными значениями параметров.

Естественно, что более универсальным методом для решения задач о переходных режимах всех двигателей постоянного тока следует считать графо-аналитические методы приближенного интегрирования [Л. 124, 125, 126 и 113].

Наиболее часто применяемый метод основывается на свойстве первой производной характеризовать значение тангенса угла, образуемого положительным направлением оси абсцисс и касательных в любой точке искомой кривой.

Последовательное проведение касательных или вычисление отсекаемых ими отрезков дает возможность получить кривую или кривые, выражаемые одним или несколькими дифференциальными уравнениями первого порядка. В последнем случае несколько уравнений решается совместно: комбинация отрезков касательных, как известно, с достаточной точностью дает искомую кривую.

Так в случае привода с серийным двигателем уравнения должны быть переписаны в форме

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_1 I - M_m}{J}, \quad (414)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U - IR - k_2 \omega}{L}, \quad (415)$$

Решение производится следующим образом. Исходя из начального значения $I_{нач}$, определяем по (414) $\frac{d\omega}{dt}$. Под углом $\alpha = \arctg \frac{d\omega}{dt}$ проводим прямую. Она определит закон роста скорости на участке Δt . Далее, беря из экспериментально найденной кривой $L=f(I)$ значение L , соответствующее $I_{нач}$, подставляем его в (415). Зная среднюю скорость $\omega_m = \frac{\Delta\omega \cdot \Delta t}{2}$, находим $\frac{dI}{dt}$ для первого участка. Наклон кривой $I=f(t)$ к оси абсцисс для первого участка определяется углом

$$\beta = \arctg \frac{dI}{dt},$$

Все последующее построение аналогично и представлено на фиг. 210. Дальнейшее уточнение может быть сделано повторным построением. Для этого в равенство (414) вместо $I_{нач}$ подставляем $(I_{нач} \pm \frac{\Delta I'}{2})$. Для этого тока находим значение L . Подставляем имеющиеся величины в (415). Второе построение дает обычно

достаточно точные результаты. Все подсчеты могут быть проделаны и чисто аналитическим путем. В свою очередь возможно также и применение принципа пропорций.

Взамен совместного графического решения методом производной нескольких уравнений первого порядка можно сразу решать уравнение второго порядка, пользуясь методом касательной и радиуса кривизны (Кельвина), ибо дифференциальное уравнение второго порядка как раз выражает зависимость радиуса кривизны от места и направления.

Уравнение второй производной в нашем случае для тока имеет вид

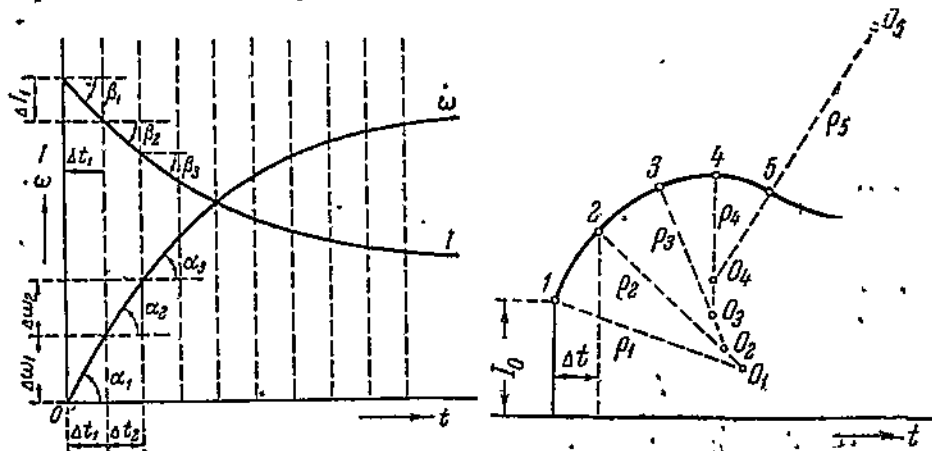
$$\frac{d^2 I}{dt^2} = D_1 \left(\frac{dI}{dt} \right)^2 + D_2 \cdot \frac{dI}{dt} + D_3. \quad (416)$$

Радиус кривизны находится по первой и второй производной и определяется выражением

$$\rho = \frac{\left[1 + \left(\frac{dI}{dt} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{d^2 I}{dt^2}} = \frac{\left[1 + \left(\frac{dI}{dt} \right)^2 \right]^{3/2}}{D_1 \cdot \left(\frac{dI}{dt} \right)^2 + D_2 \cdot \frac{dI}{dt} + D_3}. \quad (417)$$

В формуле (417) величина радиуса кривизны ρ получается в $A^2/\text{сек}$. Для нахождения ρ в см, нужно величину из (417) разделить на отношение квадрата масштаба тока и масштаба времени, т. е. на $\frac{\mu_I^2}{\mu_t}$, где μ_I — масштаб тока в А в см, а μ_t — масштаб времени в сек в см. Соответственно $\frac{dI}{dt} \text{ tg } \alpha \cdot \frac{\mu_I}{\mu_t}$.

Построение производится согласно фиг. 221. В каждой точке кривой известно направление касательных и радиусы кривизны



Фиг. 220. Графо-аналитическое решение уравнений переходных режимов.

Фиг. 221. Графическое интегрирование для нахождения кривой $I=f(t)$ по методу Кельвина.

$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ и т. д. Отдельные участки кривой могут быть найдены как отрезки дуг, описанных из центров O_1, O_2, \dots, O_n , лежащих на перпендикуляре к касательной на расстоянии $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ от кривой.

Удобным для решения уравнения (416) является также двукратное применение метода Эйлера. В этом случае, обозначая $\frac{df}{dt}$ через z , уравнению (416) придают вид

$$\frac{dz}{dt} = D_1 z^2 + D_2 \cdot z + D. \quad (418)$$

Сначала по соответствующему равенству [например (415)] вычисляют приближенное значение $z_0 = \frac{df}{dt}$ для начального момента

времени $t=0$. Подставляя полученное значение в (418), определяют $\frac{dz}{dt}$ для $t=0$. Полагая, что элементарному приращению Δt соответствует малое приращение Δz , находят

$$\Delta z = \frac{dz}{dt} \cdot \Delta t. \quad (419)$$

Прибавляя Δz к z_0 , получают значение z_1 для момента времени Δt_1 . Вычисленная таким образом кривая z нанесена на фиг. 222. Приращение силы тока ΔI над исходной I_0 за тот же промежуток времени определяется в соответствующем масштабе площадью трапеции $ABCD$

$$\Delta I = s_1 = \frac{2z_0 + \Delta z}{2} \cdot \Delta t \quad (420)$$

Фиг. 222. Построение кривой тока по методу Эйлера.

Соответствующая кривая $I = f(t)$ также показана на фиг. 222.

Рассмотрим подход к решению уравнений переходных режимов для более общего случая компаундной машины [Л. 113].

Для нее

$$I = \frac{U - \left(E_a + L \cdot \frac{df}{dt} + M \cdot \frac{dl}{dt} \right)}{R}. \quad (421)$$

Так как $E_a = c_a \cdot \Phi_a \cdot n_a$, то

$$c_a \cdot \Phi_a \cdot n_a = U - \left(L \cdot \frac{df}{dt} + M \cdot \frac{dl}{dt} + IR \right),$$

откуда

$$n_d = \frac{U - (L \cdot \frac{dI}{dt} + M \cdot \frac{dI}{dt} + IR)}{c_d \Phi_d} \quad (422)$$

Далее обращаемся к уравнению движения электропривода

$$M_d = M_m + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

Подставляя в него значение $\frac{dn}{dt}$, получим

$$M_d = c \cdot \Phi_d \cdot I = M_m + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{d}{dt} \left[\frac{U - (L \frac{dI}{dt} + M \frac{dI}{dt} + IR)}{c_d \Phi_d} \right] \quad (423)$$

Такие параметры машины, как L и M , являясь зависимыми от насыщения, меняются в переходных режимах непрерывно. Однако для очень малых промежутков времени их можно принимать постоянными, беря для каждого элементарного участка значение их из экспериментально найденных кривых $L=f(I)$ и $M=f(I)$. В таком случае, принимая M и $L = \text{const}$ и преобразовывая равенство (423), будем иметь

$$\left. \begin{aligned} J \cdot \Phi_d \cdot L \frac{d^2 I}{dt^2} + J \left(\Phi_d \cdot R - L \cdot \frac{d\Phi_d}{dt} \right) \cdot \frac{dI}{dt} + \left(c_d^2 \cdot \Phi_d^2 - J \cdot R \cdot \frac{d\Phi_d}{dt} \right) I = \\ = c_d \cdot \Phi_d^2 \cdot M_m - J \cdot \frac{d\Phi_d}{dt} \left(U - M \cdot \frac{dI}{dt} \right) - J \cdot \Phi_d \cdot M \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} \end{aligned} \right\} (424)$$

Равенство (424) получено нами для компаундного двигателя. Уравнение серийной машины получится, если принять $M=0$.

В случае шунтового двигателя при пренебрежении в нем реакцией якоря также следует, очевидно, принимать коэффициент взаимоиנדукции $M=0$.

Далее в шунтовом двигателе при расчетах иногда представляется возможным пренебречь и влиянием коэффициента самоиндукции якоря $L=0$.

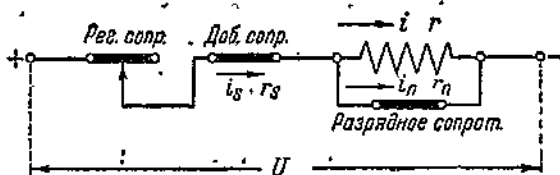
Тогда при $L=0$ и $M=0$ уравнение получает вид

$$\frac{dI}{dt} = - \frac{U}{R \cdot \Phi_d} \cdot \frac{d\Phi_d}{dt} - I \left(\frac{c_d \cdot \Phi_d^2}{J \cdot R} - \frac{1}{\Phi_d} \cdot \frac{d\Phi_d}{dt} \right) + \frac{c_d \cdot \Phi_d}{J \cdot R} \cdot M_m \quad (425)$$

Для компаундной (а иногда и для шунтовой) машины решение уравнения (424) нужно производить совместно с решением уравнения для цепи возбуждения. Схема шунтовой цепи возбуждения

с разрядным сопротивлением представлена на фиг. 223. Согласно обозначениям, принятым на чертеже при регулируемом сопротивлении, равном нулю, можно написать

$$U = i_s r_s + i r + L_n \frac{di}{dt} + (M - M_{nr}) \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (426)$$



Фиг. 223. Схема шунтовой цепи возбуждения.

$$U = i_s r_s + i r_n, \quad (427)$$

$$i_s = i + i_n. \quad (428)$$

Отсюда

$$U = i_s r_s + i_s r_n - i_n r_n$$

или

$$i_s = \frac{U}{r_s + r_n} + \frac{i r_n}{r_s + r_n}. \quad (429)$$

Подставляя (426) в (423) и учитывая, что

$$r' = \frac{r_s \cdot r_n}{r_s + r_n},$$

получим

$$U \left(1 - \frac{r'}{r_n} \right) - i(r + r') = L_n \frac{di}{dt} + (M - M_{nr}) \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (430)$$

Из (430) находим

$$\frac{di}{dt} = \frac{U \left(1 - \frac{r'}{r_n} \right) - i(r + r')}{L_n} - \frac{(M - M_{nr})}{L_n} \cdot \frac{dI}{dt} = \beta - \gamma \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (431)$$

Дифференцируя, получаем

$$\frac{d^2 i}{dt^2} = \frac{r_n + r'}{L_n} \frac{di}{dt} - \left(\frac{M - M_{nr}}{L_n} \right) \cdot \frac{d^2 I}{dt^2}. \quad (432)$$

Подставляя в (432) $\frac{dI}{dt}$ из (431), будет иметь

$$\frac{d^2 i}{dt^2} = \left. \begin{aligned} & \frac{U \left(1 - \frac{r'}{r_n} \right) - i(r + r')}{L_n} \cdot \frac{r_n + r'}{L_n} + \frac{(r_n + r')}{L_n} \cdot \frac{(M - M_{nr})}{L_n} \cdot \frac{dI}{dt} - \\ & - \frac{(M - M_{nr})}{L_n} \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} \end{aligned} \right\} (433)$$

Или для упрощения

$$\frac{d^2 i}{dt^2} = -\delta\beta + \delta\gamma \cdot \frac{di}{dt} - \gamma \cdot \frac{d^2 I}{dt^2}. \quad (434)$$

Уравнение (434) имеет вид (416) и к нему может быть применена изложенная выше методика графо-аналитического интегрирования.

Далее требуется совместное решение уравнений (424) и (434), для чего нужно учитывать изменение результирующего потока двигателя $\Phi_d = f(I, i)$, являющегося одновременно функцией ампервитков шунтовой и серийной обмоток и размагничивающих ампервитков реакции якоря:

$$\frac{d\Phi_d}{dt} = \frac{d\Phi_d}{di} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{d\Phi_d}{dI} \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (435)$$

Величины $\frac{d\Phi_d}{di}$ и $\frac{d\Phi_d}{dI}$ должны определяться по участкам из кривой намагничивания графическим способом.

Беря значение $\frac{di}{dt}$ из (431) и подставляя в (435), получим

$$\frac{d\Phi_d}{dt} = \beta \cdot \frac{d\Phi_d}{di} + \left(\frac{\partial \Phi_d}{\partial I} - \gamma \cdot \frac{\partial \Phi_d}{\partial I} \right) \frac{dI}{dt} = \beta \cdot \frac{d\Phi_d}{di} + \varphi \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (436)$$

Полученное значение $\frac{d\Phi_d}{dt}$ нужно подставить в (424). В том же равенстве нужно заменить $\frac{di}{dt}$ и $\frac{d^2 i}{dt^2}$ из (431) и (434),

Уравнение (424) получит вид

$$\left. \begin{aligned} J[\Phi_d L - \gamma \cdot \Phi_d \cdot M] \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} = & J[(\Phi_d \cdot R - R \cdot I \cdot \varphi + \varphi \cdot U - M \cdot \varphi \cdot \beta + \\ & + \Phi_d \cdot M \cdot \delta \cdot \gamma) \frac{d\Phi_d}{di} (J \cdot L \cdot \beta + J \cdot M \cdot \beta \cdot \gamma)] \frac{dI}{dt} - J \cdot \varphi (L - M \gamma) \left(\frac{dI}{dt} \right)^2 + \\ & + c_d^3 \cdot \Phi_d^3 \cdot I - c_d \cdot \Phi_d^3 \cdot M_m - J \Phi_d M \delta \beta + \frac{d\Phi_d}{dt} (J R \beta + J U \beta - J M \beta^2). \end{aligned} \right\} \quad (437)$$

При приближенном решении уравнения (437) по участкам все коэффициенты при производных и свободный член принимаются для каждого участка неизменными. В таком случае уравнение (437) получает вид

$$K_1 \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} = K_2 \cdot \left(\frac{dI}{dt} \right)^2 + K_3 \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{K_4}{K_1}. \quad (437')$$

После деления на K_1 это уравнение будет одинаково с (416). В соответствии с непрерывным изменением L , M , Φ коэффициенты K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , δ , γ , β будут вообще переменными, поэтому при-

нимаемые для них постоянные значения должны вычисляться для каждого участка отдельно.

Методика графического решения уравнения (437')—(416) была изложена выше. Нахождение силы тока производится по равенству (437), приведенному к виду (437'). Расчет начинается с определения второй производной для периода $t=0$. При этом значения коэффициентов приходится относить к установившемуся режиму. Что же касается первой производной, то для периода $t=0$ она находится приближенно по равенству (425) в предположении $L=0$ и $M=0$. Одновременно с кривой главного тока $I=f(t)$ строятся кривые $i=\varphi(t)$, $\Phi=\psi(t)$ и $n=f(t)$.

Параллельное построение этих кривых необходимо для нахождения численных значений коэффициентов для (437) и (431). Ток возбуждения находится по равенству (431) после определения I и $\frac{dI}{dt}$ для каждого участка. Кривая $\Phi=\varphi(t)$ строится по кривой $i=f(t)$ совместно с кривой намагничивания. Величина вращающего момента двигателя вычисляется по равенству $M=c \cdot I \cdot \Phi$. Что же касается скорости, то она находится из уравнения (421).

73. Общие соображения о переходных режимах электроприводов с асинхронными двигателями

В асинхронных двигателях, так же как и в машинах постоянного тока, можно естественно говорить или о механических переходных режимах или же об электромеханических. Отличие механических переходных режимов от электромеханических в электроприводах постоянного тока вызывается влиянием самоиндукции. В асинхронных машинах, как и во всех других электромагнитных механизмах переменного тока, при включении их цепей на напряжение или при отключении от него кроме токов, имеющих частоту сети, возникают выравнивающие токи; как результат свободных колебаний подобных систем.

Величина выравнивающих токов зависит от момента включения или переключения двигателя, т. е. от того, имеет ли в этот момент э. д. с. сети максимум или нуль или какое-нибудь промежуточное значение [Л. 58].

Для полного рассмотрения электромеханических переходных режимов асинхронных двигателей необходимо совместное решение трех уравнений:

1) обычного уравнения движения электропривода;

2) двух дифференциальных уравнений э. д. с. и падений напряжений в статорной и роторной цепи вида

$$U = i_1 r_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}, \quad (438)$$

$$0 = i_2 r_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M \cdot \frac{di_1}{dt}, \quad (439)$$

где U — напряжение, приложенное к статору; i_1 и i_2 — мгновенные значения первичного и вторичного тока; L_1 и L_2 — полные коэффициенты самоиндукции статорной и роторной цепи; M — коэффициент их взаимоиндукции.

Аналитическое совместное решение всех трех уравнений для большинства случаев практики оказывается невозможным. Решение их может быть получено лишь одним из графо-аналитических методов, описанных выше.

Вместе с тем наиболее резкое изменение переходных выравнивающих токов происходит обычно в весьма короткий промежуток времени, длящийся в течение нескольких периодов переменного тока после включения или переключения. Далее величина этих токов становится малой. Существенного значения на ускорение и замедление двигателя выравнивающие токи вследствие кратковременности их действия обычно не оказывают. Таким образом с точки зрения производительности электроприводов и нагревания электродвигателей выравнивающие токи мало существенны. Выравнивающие токи имеют значение преимущественно с точки зрения возникающих в двигателях перенапряжений (в первую очередь в двигателях большой мощности), а также получающихся толчков тока. Величина последних существенна с точки зрения анализа работы автоматической аппаратуры и сопоставления различных принципов автоматического управления двигателями.

В практике электропривода с асинхронными двигателями до сих пор ограничивались исключительно рассмотрением механических переходных режимов. Таков же будет объем рассмотрения переходных режимов асинхронных двигателей в данной книге. Изучение электромеханических режимов должно составить предмет последующих научных работ.

Касаясь механических переходных режимов приводов с асинхронными двигателями, нужно иметь в виду следующее. Поскольку речь идет о режимах асинхронного двигателя, соответствующих работе на естественной характеристике при скольжении от $s=0$ примерно до $(1,3 \div 1,5) s_N$, а иногда даже и до $1,75 s_N$, то для большинства случаев практики механическая характеристика на этом участке может быть принята за прямолинейную. Это положение относится как к короткозамкнутым двигателям, так и к двигателям с кольцами.

Во многих случаях прямолинейность характеристики может быть принята для двигателя с кольцами, работающего с реостатом в цепи ротора при всех значениях s от 0 до 2. При этом условии механические переходные режимы электропривода с асинхронным двигателем протекают так же, как и в шунтовых двигателях постоянного тока. Все соответствующие вопросы были рассмотрены выше в пп. 49—56 и что-либо особо специфическое в этом отношении добавить нельзя,

Несколько сложнее дело обстоит в том случае, когда бывает необходимо учитывать криволинейность асинхронной характеристики при работе около точки опрокидывания. Здесь недоучет криволинейности характеристики может дать неправильное представление о динамической устойчивости электропривода и повести к недооценке использования маховых масс, а при их выборе к их завышению. Точное изучение поведения двигателя около точки опрокидывания весьма существенно, в особенности тогда, когда мы в некоторых электроприводах кратковременно в целях лучшего использования маховых масс допускаем кратковременный переход через точку опрокидывания с последующим возвратом на часть характеристики, соответствующую скольжению $s = 0 \rightarrow s_m$.

Совершенно обязательным является анализ работы на части характеристики, соответствующей $s = s_m \div 1$ короткозамкнутых двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме работы. Здесь, как и при работе около точки опрокидывания, необходимо применять то или иное выражение, учитывающее криволинейность характеристики. Наиболее часто для этой цели используется упрощенное или полное уравнение Клосса. Однако был целый ряд попыток замены криволинейной формы характеристики несколькими прямыми, параболой и прямой и т. д. Некоторая сложность математического анализа ведет иногда к тому, что в отдельных случаях из-за громоздких математических выкладок скрадывается физическая сущность. Нами вопрос будет рассмотрен в порядке постепенного усложнения в основном на базе упрощенного и полного уравнения Клосса.

Полная формула Клосса обычно с достаточной точностью учитывает главнейшие физические процессы, происходящие в обыкновенных асинхронных двигателях, и в этом отношении точность ее для целей привода во многих случаях оказывается вполне достаточной.

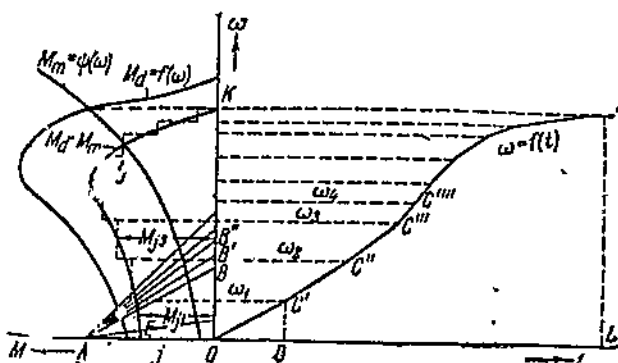
Вряд ли целесообразно, да и едва ли можно какими-либо геометрическими заменами повысить эту точность. При отсутствии же практической возможности использовать уточненную формулу Клосса приходится иногда идти на упрощенную, памятуя, что в ряде случаев она может давать большую погрешность.

Предварительно отметим еще ряд обстоятельств.

Аналитическое решение уравнения до криволинейной части асинхронной характеристики возможно лишь в том случае, если $M_m = \text{const}$. Во всех остальных случаях необходимо применение того или иного графо-аналитического метода. Эти методы естественно являются универсальными и могут быть рекомендованы для использования и в электроприводах с короткозамкнутыми двигателями.

Для практических целей находят применение два основных метода: 1) аналитический метод с решением по участкам в случае принятия прямолинейного изменения динамического момента на каждом участке. Этот метод был рассмотрен выше (п. 26);

2) принцип пропорций. Для примера на фиг. 224 представлено применение принципа пропорций для задачи о времени пуска электропривода вентилятора с короткозамкнутым двигателем.



Фиг. 224. Применение принципа пропорций к пуску электропривода вентилятора с короткозамкнутым двигателем.

Обоснование и методика построения были приведены выше. В левой части фиг. 224 построена механическая характеристика двигателя $M_d + f(\omega)$ и кривая статического момента

$$M_m = \varphi(\omega) = M_0 + c\omega^2.$$

Вычитанием из M_d величины M_m получена кривая динамического момента M_d . Последняя разделена на ряд участков с постоянными значениями M_{d2} . В том же квадранте по оси абсцисс в соответствующем масштабе отложен момент инерции J . В правой части проведено построение кривой $\omega = f(t)$ по принципу пропорций. За время пуска можно считать период, необходимый электроприводу для достижения скорости, равной $0,98 \omega_0$.

Имея характеристику $M_d = f\omega$ и построив кривую $\omega = f(t)$, легко получить кривые $M_d = f(t)$ и $I_d = \varphi(L)$. Перечисленные два метода приближенного интегрирования естественно применимы почти ко всем приводам с асинхронными двигателями и притом с достаточной практически точностью. Исключение составляет лишь исследование работы асинхронного двигателя около точки опрокидывания, где вследствие малой протяженности участка необходимо применение аналитического решения.

Указанные методы в применении к асинхронным двигателям становятся совершенно обязательными для случаев $M_m = f(\omega)$, $M_m = f(\omega, L)$ и $M_m = f(L)$. Для случая первого аналитическое решение неприменимо из-за сложности, для случаев второго и третьего по причинам невозможности или очень большой громоздкости ре-

шения уравнения, когда $k \cdot dL = \omega \cdot dt$ (п. 62). Лишь в том случае, когда $M_m = f(\omega)$, мы можем заменить кривую статического момента участками с $M_m = \text{const}$ и получать решение по отдельным участкам. Методику решения всех этих задач мы излагать здесь не будем, так как она совершенно аналогична методике, применяемой в электроприводах постоянного тока (пн. 60—62) и для случая $M_m = f(\omega)$, представленной на фиг. 224.

Отметим еще одно обстоятельство, касающееся короткозамкнутых двигателей типа Бушера и с глубоким пазом. Аналитическое выражение кривой момента этих двигателей оказывается значительно сложнее, чем в обыкновенных короткозамкнутых двигателях с постоянными параметрами. Если в последних при $M_m = \text{const}$ аналитическое решение уравнения движения привода оказывается весьма громоздким, то для двигателей Бушера и с глубоким пазом аналитическое решение просто неосуществимо. Для этих двигателей приходится применять лишь графо-аналитическое решение.

Поэтому все излагаемые ниже аналитические решения относятся лишь к асинхронным двигателям с постоянными параметрами, т. е. исключая двигатели Бушера и с глубоким пазом. Для последних возможно лишь применение приближенных методов интегрирования (допущение прямолинейности динамических моментов по отдельным участкам, принцип пропорций).

Ниже нами будут рассмотрены аналитические способы решения уравнения движения электропривода при $M_m = \text{const}$ для случая пуска, торможения противовключением, рекуперативного (переключение полюсов) и динамического при пользовании уравнениями Клосса.

Точно так же будут даны некоторые указания об используемых в ряде случаев современной практики переходных режимах работы короткозамкнутого двигателя при переменной частоте.

74. Аналитическое рассмотрение пускового режима и режима противовключения короткозамкнутого двигателя при $M_m = \text{const}$ в случае использования упрощенного уравнения Клосса

Из рассмотрения выражений для кривой вращающего момента асинхронного двигателя (п. 39) мы видели, что упрощенное уравнение Клосса во многих случаях не может дать достаточно точных данных, в особенности при мелких короткозамкнутых двигателях. Тем не менее мы считаем необходимым дать для него решение уравнения движения электропривода, так как в ряде случаев оно все-таки может быть использовано. Кроме того эти решения представляют некоторый интерес и в отношении общих выводов о поведении привода с короткозамкнутым двигателем. Решение дадим сначала в абсолютных величинах, а затем используя метод относительных единиц.

Наиболее простое решение, данное в свое время впервые еще Рюденбергом, получается при $M_m = 0$. Этот случай имеет прак-

тическое значение для таких исполнительных механизмов, пускаемых вхолостую, в которых статическим моментом холостого хода можно пренебречь. При этом уравнение привода получит вид

$$M_d = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt}, \quad (440)$$

откуда

$$dt = \frac{GD^2}{2 \cdot 375} \cdot \frac{n_0}{M_m} \cdot \left(\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} \right) \cdot ds. \quad (441)$$

Поскольку принятая нами форма кривой момента короткозамкнутого двигателя будет справедлива и для режима противовключения, то ход решения для пуска и для торможения противовключением будет одинаковым. Разница в рассмотрении пуска и торможения по указанному способу будет заключаться лишь в пределах интегрирования.

Вынесем за скобки s_m и обозначим через Q так называемую опрокидывающую электромеханическую постоянную

$$Q = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0 \cdot s_m}{M_m} = B \cdot \frac{s_m}{s_N} \cdot \frac{M_N}{M_m}. \quad (442)$$

Очевидно, что в электромеханической постоянной асинхронного двигателя в отличие от шунтового постоянного тока появляется коэффициент $\frac{s_m}{s_N} \cdot \frac{M_N}{M_m}$ вследствие непрямолинейности механической характеристики. В электроприводе с шунтовым двигателем этот коэффициент равен единице.

Интегрируя равенство (441) в пределах от s_1 до s_2 , получим

$$t = \frac{Q}{2} \cdot \int_{s_1}^{s_2} \left(\frac{s}{s_m} + \frac{1}{s} \right) \cdot ds = \frac{Q}{2} \left[\frac{s^2}{2s_m^2} + \ln s \right]_{s_1}^{s_2} = \left. \begin{aligned} &= \frac{Q}{2} \left(\frac{s_2^2 - s_1^2}{2s_m^2} + \ln \frac{s_2}{s_1} \right). \end{aligned} \right\} \quad (443)$$

Это выражение показывает, что кривая s , а стало быть и M_d могут быть найдены для асинхронного двигателя лишь в трансцендентной форме. Поэтому для получения времен переходных режимов от одной скорости до другой удобнее строить кривые.

Время пуска от $s_2 = 1$ до $s_1 = s_0$ будет

$$t = \frac{Q}{2} \left(\frac{1 - s_0^2}{2s_m^2} + \ln \frac{1}{s_0} \right). \quad (444)$$

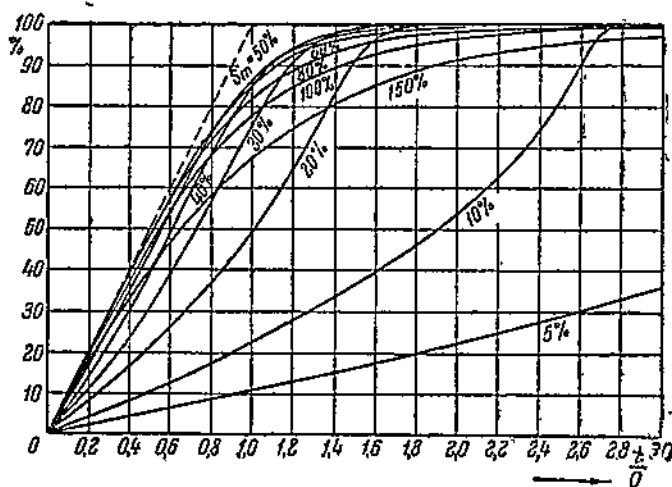
Так же как и при экспоненциальных функциях, время пуска теоретически для $s_0 = 0$ получается равным бесконечности. По-

этому для второго члена в скобках (444) вместо s_0 в практических решениях задачи нужно брать величину 0,05.

Время пуска вхолостую выразится

$$t_{p0} = \frac{Q}{2} \left(\frac{-1}{2s_m^2} + \ln \frac{1}{0,05} \right). \quad (445)$$

Как видно из равенства (445), время пуска зависит от величины постоянной Q и опрокидывающего скольжения s_m . На фиг. 225 показаны полученные в свое время Рюденбергом кривые зависимости $\frac{\omega}{\omega_0}$ в функции от $\frac{t}{Q}$ для разных значений s_m . Есте-



Фиг. 225. Кривые $\frac{\omega}{\omega_0}$ в функции $\frac{t}{Q}$ при разных значениях s_m для пуска и торможения противозвключением.

ственно, что полученные кривые могут быть использованы для разных типов короткозамкнутых двигателей, подчиняющихся уравнению Клосса.

Интересно отметить, что с увеличением s_m время пуска сначала уменьшается, а затем снова начинает увеличиваться.

Для нахождения условий минимума времени пуска вхолостую нужно взять производную от времени пуска по опрокидывающему скольжению и приравнять ее нулю

$$\begin{aligned} \frac{dt_{p0}}{ds_m} &= \frac{d}{ds_m} \left(\frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot 4 \cdot s_m \cdot M_m} + \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2 \cdot n_0 \cdot s_m}{375 \cdot M_m} \ln \frac{1}{0,05} \right) = \\ &= \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_m^2} \left(\ln \frac{1}{0,05} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{s_m^2} \right) = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$s_m = \sqrt{\frac{1}{2 \ln \frac{1}{0,05}}} \quad (446)$$

Определим теперь полное время торможения вхолостую при противовключении, т. е. при изменении скольжения s от $(2-s_2) \approx 2$ до 1. В этом случае согласно (443)

$$t_2 = \frac{Q}{2} \left(\frac{3}{2s_m^2} + \ln 2 \right) \quad (447)$$

Определим потери в цепи ротора двигателя при пуске и торможении противовключением вхолостую. Эти данные необходимы будут нам в дальнейшем для решения вопросов о выборе мощности короткозамкнутого асинхронного двигателя при переменном режиме работы,

Соответствующее соотношение для пуска было выведено уже ранее в п. 27.

Потери в цепи ротора при пуске вхолостую, т. е. при $M_d = M_f$, будут

$$\left. \begin{aligned} A_{\text{мех}} &= \int_0^{t_p} M_d \cdot \omega_0 \cdot s \cdot dt = \int_0^{t_p} J \cdot \frac{d\omega}{dt} \omega_0 \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot dt = \\ &= J \int_0^{\omega_0} (\omega_0 - \omega) \cdot d\omega = J \left[\omega_0 \cdot \omega - \frac{\omega^2}{2} \right]_0^{\omega_0} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (448)$$

При разгоне до $\omega = \omega_r$

$$A_{\text{мех}} = J \cdot \left[\omega_0 \cdot \omega - \frac{\omega^2}{2} \right]_0^{\omega_r} = J \left(\omega_0 \omega_r - \frac{\omega_r^2}{2} \right) = \frac{J^2 \omega_0}{2} (1 - s^2) \quad (449)$$

Потери в цепи ротора при торможении вхолостую противовключением

$$A_{\text{мех}} = J \left[\omega_0 \cdot \omega - \frac{\omega^2}{2} \right]_{-\omega_0}^0 = \frac{3}{2} \cdot J \cdot \omega_0^2 \quad (450)$$

Сопоставление двух приведенных равенств (448) и (450) приводит нас к очень важному практическому выводу. Потери энергии в роторе при работе вхолостую в случае торможения противовключением оказываются в три раза больше, чем при пуске.

Во всех случаях работы некоторого двигателя средние потери в нем должны остаться неизменными. Положим, что мы имеем короткозамкнутый двигатель, работающий при $M_m = 0$ исключительно в пусковых режимах (пуск и механическое торможение). За пуском немедленно следует торможение, снова пуск и т. д. С точки зрения нагрева подобный двигатель допускает Z включений в час. Заставим тот же двигатель и в тех же условиях пуска

и торможения работать при электрическом торможении путем противовключения. Поскольку потери при торможении противовключением в три раза больше, чем при пуске, то каждый цикл второго варианта обусловит потери в четыре раза больше, чем каждый цикл первого варианта. Следовательно, допустимое число включений в час двигателя во втором режиме будет $\frac{Z}{4}$,

Решим теперь то же уравнение (441), но с использованием метода относительных единиц с тем, чтобы применить этот метод ко всем последующим решениям.

В отличие от шунтовых двигателей в короткозамкнутых оказывается более удобным брать за масштаб момента не номинальный момент M_N , а максимальный M_m , за масштаб скольжения принимать опрокидывающее s_m и за масштаб времени упомянутую выше опрокидывающую электромеханическую постоянную $Q = \frac{GD^3 \cdot n_0 \cdot s_m}{375 \cdot M_m}$.

Упрощенное уравнение Клосса в относительных единицах будет

$$\mu_d = \frac{M_d}{M_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} = \frac{2}{\sigma + \frac{1}{\tau}} = \frac{2\sigma}{\sigma^2 + 1}. \quad (451)$$

Беря уравнение движения привода для $M_m = 0$ и вводя в него M_m и s_m , получим

$$\left. \begin{aligned} \mu_d &= \frac{M_d}{M_m} = - \frac{GD^3 \cdot n_0 \cdot s_m}{375 \cdot M_m} \cdot \frac{d\left(\frac{s}{s_m}\right)}{dt} = - \\ &- Q \frac{d\left(\frac{s}{s_m}\right)}{dt} = - \frac{d\left(\frac{s}{s_m}\right)}{d\left(\frac{t}{Q}\right)}. \end{aligned} \right\} \quad (452)$$

Переходя к относительным единицам, получим

$$\mu_d = - \frac{d\sigma}{d\tau}, \quad (453)$$

где μ_d , σ , τ — момент, скольжение и время в относительных единицах.

Подставляя (451) в (453), получим

$$\frac{2\sigma}{\sigma^2 + 1} = - \frac{d\sigma}{d\tau} \quad (454)$$

или

$$d\tau = - \frac{\sigma^2 + 1}{2\sigma} d\sigma = - \left(\frac{\sigma}{2} + \frac{1}{2\sigma} \right) \cdot d\sigma.$$

Интегрируя в пределах σ_1 и σ_2 , получаем

$$\tau = - \int_{\sigma_2}^{\sigma_1} \left(\frac{\sigma}{2} + \frac{1}{2\sigma} \right) d\sigma = \left[\frac{\sigma^2}{4} + \frac{1}{2} \ln \sigma \right]_{\sigma_1}^{\sigma_2} = \frac{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}{4} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1}. \quad (455)$$

Если мы умножим τ на Q и вместо σ введем s , то получим равенство (443). Рассмотрение разобранных упрощенных случаев для $M_m = 0$ дает нам возможность перейти к более сложным, анализ которых мы проведем с использованием метода относительных единиц.

75. Аналитическое рассмотрение пускового режима и режима противовключения короткозамкнутого двигателя при $M_m = \text{const}$ в случае использования упрощенного уравнения Клосса. (в относительных единицах)

Если относительный момент нагрузки, равный $\frac{M_m}{M_{\text{max}}}$, обозначим через μ_m , то уравнение движения электропривода для пуска и торможения противовключением при $\mu_m \neq 0$ напишется в виде

$$\frac{2\sigma}{1+\sigma^2} \pm \mu_m = - \frac{d\sigma}{d\tau}. \quad (456)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{\frac{2\sigma}{1+\sigma^2} \pm \mu_m} = \mp \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{(1+\sigma^2) d\sigma}{\mu_m \sigma^2 \mp 2\sigma + \mu_m} = \mp \frac{1}{\mu_m} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{(1+\sigma^2) d\sigma}{\sigma^2 \mp \frac{2\sigma}{\mu_m} + 1} \\ &= \mp \frac{1}{\mu_m} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{\left(\sigma^2 - \frac{2}{\mu_m} \sigma + 1 \right)}{\sigma^2 \mp \frac{2\sigma}{\mu_m} + 1} d\sigma - \frac{1}{\mu_m} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{\frac{2}{\mu_m} \sigma}{\sigma^2 \mp \frac{2}{\mu_m} \sigma + 1} d\sigma = D_1 + D_2. \end{aligned} \right\} \quad (457)$$

Первый интеграл, как видно, весьма прост

$$D_1 = \mp \frac{1}{\mu_m} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} d\sigma = \mp \frac{1}{\mu_m} (\sigma_2 - \sigma_1). \quad (458)$$

Второй интеграл

$$\left. \begin{aligned} D_2 &= - \frac{2}{\mu_m^2} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{\sigma}{\sigma^2 \mp \frac{2}{\mu_m} \sigma + 1} d\sigma = \\ &= - \frac{2}{\mu_m^2} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{\sigma}{\left(\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} \right)^2 - \frac{1}{\mu_m^2} + 1} d\sigma. \end{aligned} \right\} \quad (459)$$

Решение этого интеграла зависит от того, будет ли $\frac{1}{\mu_m} \geq 1$.

Мы рассмотрим лишь реальный случай $\frac{1}{\mu_m} > 1$, так как при $\frac{1}{\mu_m} < 1$ двигатель не возьмет с места. Положим, что $(\frac{1}{\mu_m} - 1) = \gamma^2$.

В таком случае

$$D_2 = -\frac{2}{\mu_m^2} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{\sigma \cdot d\sigma}{\left(\sigma \mp \frac{1}{\mu_m}\right)^2 - \gamma^2} =$$

$$= -\frac{2}{\mu_m^2} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{\sigma \cdot d\sigma}{\left(\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} - \gamma\right) \left(\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} + \gamma\right)} \quad (460)$$

Решая методом неопределенных коэффициентов, полагаем

$$\frac{\sigma}{\left(\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} - \gamma\right) \left(\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} + \gamma\right)} = \frac{A}{\left(\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} - \gamma\right)} + \frac{B}{\left(\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} + \gamma\right)}$$

Приводя к общему знаменателю после преобразований, имеем

$$\sigma = A \left(\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} + \gamma\right) + B \left(\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} - \gamma\right)$$

$$\text{при } \sigma = \pm \frac{1}{\mu_m} - \gamma \quad B = \mp \frac{1}{2\gamma\mu_m} + \frac{1}{2},$$

$$\text{при } \sigma = \pm \frac{1}{\mu_m} + \gamma \quad A = \pm \frac{1}{2\gamma\mu_m} + \frac{1}{2}.$$

В таком случае

$$D_2 = -\frac{2}{\mu_m^2} \left[\int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{\pm \frac{1}{2\gamma\mu_m} + \frac{1}{2}}{\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} - \gamma} \cdot d\sigma + \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{\mp \frac{1}{2\gamma\mu_m} + \frac{1}{2}}{\sigma \mp \frac{1}{\mu_m} + \gamma} \cdot d\sigma \right] =$$

$$= -\frac{2}{\mu_m^2} \left[\left(\mp \frac{1}{2\gamma\mu_m} + \frac{1}{2} \right) \ln \frac{\sigma_2 \mp \frac{1}{\mu_m} + \gamma}{\sigma_1 \mp \frac{1}{\mu_m} + \gamma} + \right. \quad (461)$$

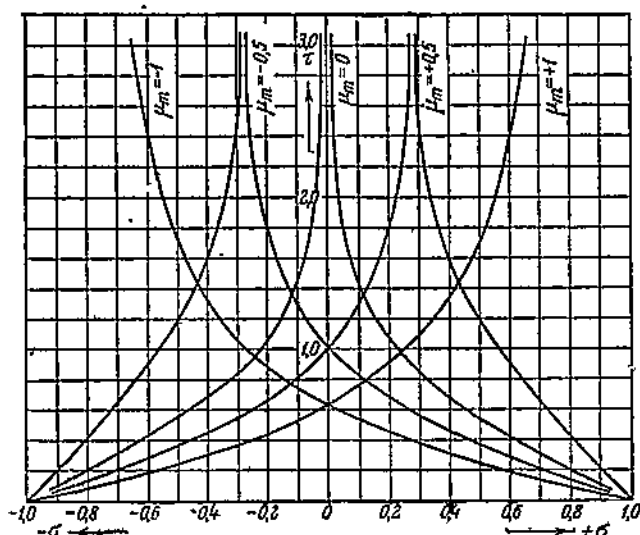
$$\left. + \left(\pm \frac{1}{2\gamma\mu_m} + \frac{1}{2} \right) \cdot \ln \frac{\sigma_2 \mp \frac{1}{\mu_m} - \gamma}{\sigma_1 \mp \frac{1}{\mu_m} - \gamma} \right]$$

откуда

$$\tau = \pm \frac{1}{\mu_m} (\sigma_2 - \sigma_1) - \frac{1}{\mu_m^2} \left[\left(\pm \frac{1}{\gamma \mu_m} + 1 \right) \cdot \ln \frac{\sigma_2 \mp \frac{1}{\mu_m} + \gamma}{\sigma_1 \mp \frac{1}{\mu_m} + \gamma} + \right. \\ \left. + \left(\pm \frac{1}{\gamma \mu_m} + 1 \right) \cdot \ln \frac{\sigma_2 \mp \frac{1}{\mu_m} - \gamma}{\sigma_1 \mp \frac{1}{\mu_m} - \gamma} \right], \quad (462)$$

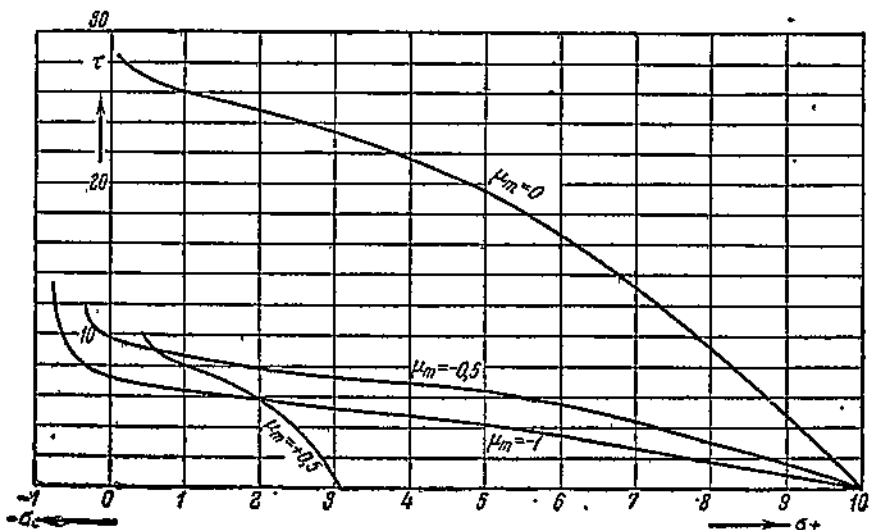
где γ — согласно прежнему равно $\sqrt{\frac{1}{\mu_m} - 1}$.

Поскольку полученное выражение весьма громоздко, то для практических целей удобнее построить универсальные кривые зависимостей σ от τ для разных значений μ_m . Эти кривые приведены на фиг. 226 и 227.



Фиг. 226. Кривые зависимости σ от τ для пуска и торможения противовключением.

На первом они даны в пределах σ от 0 до ± 1 , на втором в пределах σ от -1 до $+10$. Для определения времени перехода двигателя от σ_1 до σ_2 нужно на соответствующей кривой μ_m найти значение τ_1 и τ_2 для σ_1 и σ_2 . Разность τ_1 и τ_2 определит время перехода в относительных единицах.



Фиг. 227. Кривые для определения продолжительности переходных процессов.

76. Аналитическое рассмотрение пускового режима и режима противовключения короткозамкнутого двигателя при $M_m = \text{const}$ в случае использования полного уравнения Клосса (в относительных единицах)

Полное уравнение Клосса для двигательного режима имеет вид

$$\frac{M_d}{M_{\max}} = \frac{2 + 2\varepsilon}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2\varepsilon} = 2(1 + \varepsilon) \cdot \frac{s \cdot s_m}{s^2 + s_m^2 + 2\varepsilon s_m s} \quad (209)$$

или в относительных единицах

$$\mu_d = 2(1 + \varepsilon) \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + 2\varepsilon\sigma + 1} \quad (212)$$

Уравнение движения привода в относительных единицах получает вид

$$\mu_d - \mu_m = 2(1 + \varepsilon) \frac{\sigma}{\sigma^2 + 2\varepsilon\sigma + 1} - \mu_m = -\frac{d\sigma}{d\tau} \quad (463)$$

Для решения этого равенства Булгаков [Л. 126] воспользовался искусственной подстановкой, исходя из условия, что при установившемся движении $\frac{d\sigma}{d\tau} = 0$. При этом условии равенство (463) превращается в

$$\frac{2(1 + \varepsilon)\sigma}{\mu_m} = \sigma^2 + 2\varepsilon\sigma + 1 \quad (464)$$

или

$$\sigma^2 + \left[2\varepsilon - \frac{2(1+\varepsilon)}{\mu_m} \right] \cdot \sigma + 1 = 0. \quad (465)$$

Решение этого уравнения дает два корня

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\frac{2(1+\varepsilon)}{\mu_m} - 2\varepsilon \right] \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left[\frac{2(1+\varepsilon)}{\mu_m} - 2\varepsilon \right]^2 - 1}. \quad (466)$$

Отметим, что произведение $\sigma_1 \cdot \sigma_2 = 1$. Это нам будет необходимо в дальнейшем. Из двух корней σ_1 и σ_2 второй корень нереален, так как он относится к отрицательному скольжению, при котором μ_m имеет обратный знак. Основным условием пуска является равенство

$$\sigma_0 = \frac{1}{s_m} > \sigma_1, \text{ иначе}$$

пуск невозможен (см. фиг. 228).

Из равенства (467) находим

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \left[\frac{2(1+\varepsilon)}{\mu_m} - 2\varepsilon \right]. \quad (467)$$

или

$$\mu_m = \frac{2(1+\varepsilon)}{\sigma_1 + \sigma_2 + 2\varepsilon}. \quad (468)$$

Подставим полученное равенство в уравнение движения привода

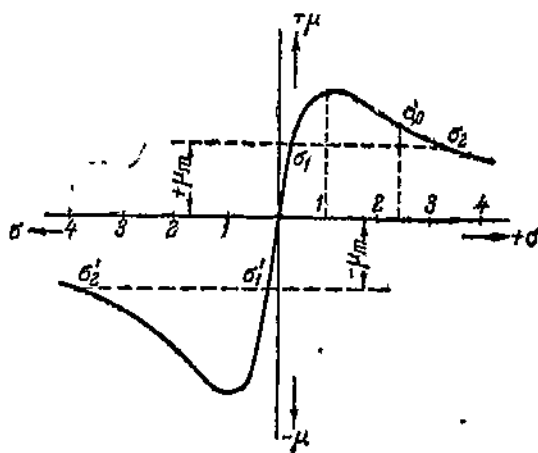
$$\mu_d - \mu_m = -\frac{d\sigma}{d\tau}. \quad (469)$$

Получим

$$d\tau = \frac{d\sigma}{\frac{2(1+\varepsilon)}{\sigma^2 + 1 + 2\varepsilon\sigma} - \mu_m} = \frac{\sigma^2 + 2\varepsilon\sigma + 1}{\mu_m \left[-\sigma^2 + \left\{ \frac{2(1+\varepsilon)}{\mu_m} - 2\varepsilon \right\} \sigma - 1 \right]} \cdot d\sigma. \quad (470)$$

Так как

$$\left(\frac{2(1+\varepsilon)}{\mu_m} - 2\varepsilon \right) = \sigma_1 + \sigma_2, \text{ а } 1 = \sigma_1 \cdot \sigma_2,$$

Фиг. 228. Кривая $\mu = f(\sigma)$

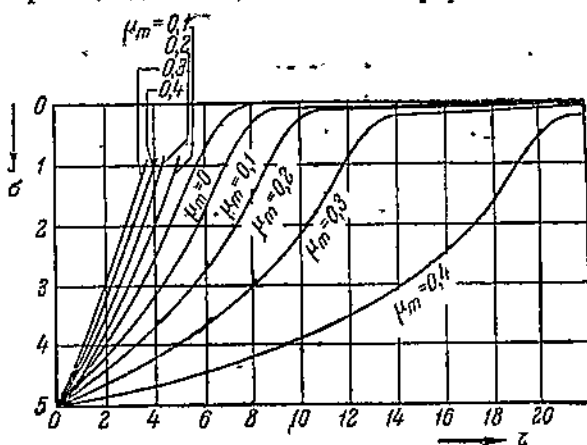
то

$$d\tau = - \frac{\sigma^2 + 2\sigma\epsilon + 1}{\mu_m(\sigma - \sigma_1)(\sigma_2 - \sigma)} \cdot d\sigma. \quad (471)$$

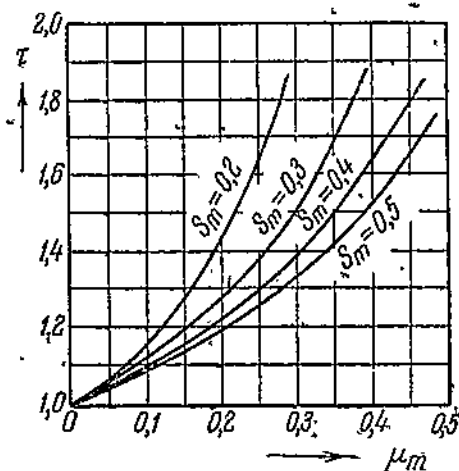
Интегрируя это равенство и учитывая, что $\sigma_1 \cdot \sigma_2 = 1$, получим

$$\tau_p = \frac{1}{\mu_m} \left\{ (\sigma - \sigma_0) - \frac{2\epsilon + \sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_2 - \sigma_1} \left[\sigma_1 \cdot \ln \frac{\sigma - \sigma_1}{\sigma_2 - \sigma_1} - \sigma_2 \cdot \ln \frac{\sigma_2 - \sigma}{\sigma_2 - \sigma_1} \right] \right\}. \quad (472)$$

Как и при $\mu_m = 0$ зависимость между τ и σ получается лишь в трансцендентной, а не явной форме. Соответствующие кривые



Фиг. 229. Кривые $\sigma = f(\tau)$ при пуске и торможении для разных значений μ_m .



Фиг. 230. Кривые $\tau = f(\mu_m)$ при пуске для разных значений σ_m .

$\sigma = f(\tau)$ для разных значений μ_m приведены на фиг. 229. На фиг. 230 приведены кривые относительного времени τ в зависимости от μ_m для разных значений σ_m . Эти кривые и могут быть использованы для расчетов.

Необходимо иметь в виду, что здесь, так же как и в шунтовых двигателях при $M_m = \text{const}$ и экспоненциальном характере кривой $n = f(t)$, время разгона теоретически равно бесконечности, что мы и получаем из (472), подставляя в него конечное значение $\sigma = \sigma_1$. Поэтому практически для получения реальных величин вместо конечного значения σ нужно подставить $\sigma = \sigma_1 + \Delta\sigma_1 = 0,95\sigma_1$.

Вследствие той искусственной подстановки, которая была применена выше, из (472) нельзя непосредственно получить время пуска вхолостую, т. е. при $\mu_m = 0$. Для этого случая ре-

шение должно быть проделано вновь. Это решение получается просто

$$\mu_d = -\frac{d\sigma}{d\tau},$$

$$2(1+\varepsilon) \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + 1 + 2\varepsilon\sigma} = -\frac{d\sigma}{d\tau}, \quad (473)$$

$$d\tau = -\frac{1}{2(1+\varepsilon)} \left(\sigma + \frac{1}{\sigma} + 2\varepsilon \right) \cdot d\sigma. \quad (474)$$

Интегрируя в пределах от $\sigma_{\text{кон}}$ до $\sigma_{\text{нач}}$, получаем

$$\tau_{p0} = \frac{1}{2(1+\varepsilon)} \cdot \left[\frac{\sigma_{\text{нач}}^2 - \sigma_{\text{кон}}^2}{2} + 2\varepsilon(\sigma_{\text{нач}} - \sigma_{\text{кон}}) + \ln \frac{\sigma_{\text{нач}}}{\sigma_{\text{кон}}} \right]. \quad (475)$$

Для получения практических величин в равенство (475) вместо ε нужно подставлять не 0, а $\frac{0,05}{s_m} = 0,05 \sigma_0$.

В режиме противовключения форма кривой тормозного момента двигателя оказывается той же самой. Поэтому решение для этого режима может быть получено простой заменой ($-\mu_m$) на $(+\mu_m)$.

В этом случае

$$d\tau = \frac{\sigma^2 + 2\varepsilon\sigma + 1}{\mu_m(\sigma + \sigma_1)(\sigma + \sigma_2)} \cdot d\sigma. \quad (476)$$

Интегрируя, как и в случае пуска, получаем

$$\tau_t = \frac{1}{\mu_m} \left\{ (\sigma - \sigma_0) - \frac{2\varepsilon\sigma + \sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_2 - \sigma_1} \left[\sigma_1 \cdot \ln \frac{\sigma_1 + \sigma}{\sigma_1 + \sigma_0} - \sigma_2 \cdot \ln \frac{\sigma_2 + \sigma}{\sigma_2 + \sigma_0} \right] \right\}. \quad (477)$$

При этом нижний предел интегрирования $\sigma = 2\sigma_0 - \sigma_1$,

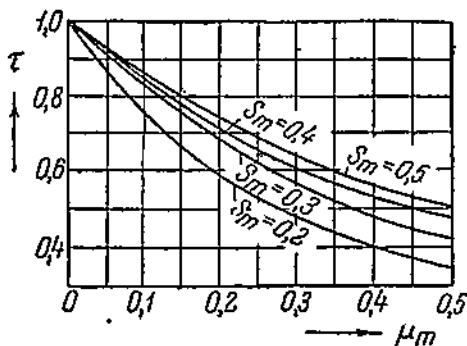
верхний же предел $\sigma_0 = \frac{1}{s_m}$.

Торможение вхолостую здесь получается простым изменением пределов интегрирования.

Время торможения от $s = 2$ до $s = 1$ при противовключении в абсолютных величинах будет равно

$$t = \frac{J \cdot \omega_0}{M_{\text{max}}} \cdot \frac{3/2 s_m + 2\varepsilon + 0,7 s_m}{2(1+\varepsilon)}. \quad (478)$$

Кривые $\sigma = f(\tau)$ в режиме противовключения для разных значений μ_m приведены в левой части фиг. 229. На фиг. 231 даны



Фиг. 231. Кривые $\tau = f(\mu_m)$ при торможении противовключением для разных значений s_m .

кривые относительных времен в зависимости от μ_m для разных значений s_m .

С увеличением опрокидывающего скольжения s_m , т. е. с увеличением активного сопротивления роторной цепи R_2^j , время торможения противовключением до некоторого предела падает, после чего начинает увеличиваться. Отсюда вытекает целесообразность применения в ряде приводов повторно-кратковременного режима короткозамкнутых двигателей с увеличенным скольжением.

Пользование этими и предыдущими кривыми весьма просто.

Исходя из $\mu_m = \frac{M_m}{M_{\max}} = \frac{M_m}{M_N \cdot \lambda}$ и значения s_m , находим τ . Далее определяем $t = \tau \cdot Q$.

Полагая, что эти кривые $\sigma = f(\tau)$ для пуска и торможения противовключением являются гиперболами вида

$$y = \frac{1}{1 + k \cdot \mu_m}, \quad \text{где } k = p + \frac{q}{s_m},$$

а p и q — численные найденные по построенным кривым коэффициенты, Булгаков дает следующие практические формулы для определения времен пуска t_p и торможения t_t

$$t_p = \frac{J\omega_0}{2(1+\epsilon)} \cdot \frac{1,9s + \frac{1}{2s_m} + 3s_m}{M_{\max} - \left(0,4 - \frac{0,22}{s_m}\right)M_m}, \quad (479)$$

$$t_t = \frac{J\omega_0}{2(1+\epsilon)} \cdot \frac{2s + \frac{3}{2} \frac{1}{s_m} + 0,69s_m}{M_{\max} + \left(0,8 + \frac{0,5}{s_m}\right)M_m}. \quad (480)$$

77. Определение потерь в цепи ротора и статора короткозамкнутого двигателя при пуске и торможении противовключением

Для определения мощности короткозамкнутого двигателя при переменном режиме работы наиболее удобным оказывается метод средних потерь. Однако подсчеты и опыт показывают, что для большинства применяемых короткозамкнутых двигателей потери в железе и механические при торможении настолько невелики, по сравнению с медными потерями в статоре и роторе, что ими можно пренебречь. Практически за весь период торможения они составляют 1,5—3% от полных джоулевых потерь в статоре и роторе двигателя за тот же период времени. Поэтому при дальнейшем определении суммарных потерь двигателя мы потерями механическими и в железе будем пренебрегать.

Для нахождения пусковых и тормозных джоулевых потерь в относительных единицах могут быть использованы, как это сделано Булгаковым, формулы, приведенные в предыдущем параграфе. При этом за масштаб энергии оказывается целесообразным взять энергию A_m , передаваемую ротору вращающимся полем при опрокидывающей мощности P_m за время, равное опрокидывающей постоянной Q .

$$A_m = P_m \cdot Q = 2 \cdot \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} \cdot s_m^2, \quad (481)$$

где $P_m = M_{\max} \cdot \omega_0 \cdot s_m$.

Очевидно, что

$$A_m = 2 \cdot A_0 \cdot s_m^2,$$

где A_0 представляет запас живой силы электропривода при синхронной скорости, равной потерям в роторе при пуске электропривода вхолостую.

Теряемая в роторе в переходном режиме мощность будет равна

$$P_2 = M \cdot \omega_0 \cdot s.$$

Деля P_2 на P_m , получим

$$\frac{P_2}{P_m} = \frac{M}{M_{\max}} \cdot \frac{s}{s_m} = \mu_d \sigma = 2(1 + \varepsilon) \cdot \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 2\varepsilon + 1}. \quad (482)$$

Потерянная в роторе энергия в относительных единицах будет

$$a_m = \frac{A_2}{A_m} = \int_0^{\tau} \mu_d \cdot \sigma \cdot \frac{dt}{Q} = \int_0^{\tau} \mu_d \sigma \cdot d\tau. \quad (483)$$

Если бы за масштаб энергии взяли величину A_0 , а не A_m , то соответствующее значение потерянной энергии в относительных единицах

$$\alpha_0 = a_m \cdot 2s_m^2.$$

Так как согласно (503)

$$d\tau = - \frac{\sigma^2 + 2 \cdot \varepsilon \sigma + 1}{\mu_m (\sigma - \sigma_1) (\sigma_2 - \sigma)} \cdot d\sigma,$$

то, подставляя (471) в (483), интегрируя и заменяя

$$\mu_m = \frac{2(1 + \varepsilon)}{\sigma_1 + \sigma_2 + 2\varepsilon}.$$

получим для пусковых потерь

$$\alpha_{mp} = (2\varepsilon + \sigma_1 + \sigma_2) \left\{ (\sigma - \sigma_0) - \frac{1}{\sigma_2 - \sigma_1} \cdot \left[\sigma_1^2 \cdot \ln \frac{\sigma - \sigma_1}{\sigma_0 - \sigma_1} - \sigma_2^2 \cdot \ln \frac{\sigma_2 - \sigma}{\sigma_2 - \sigma_0} \right] \right\} \quad (484)$$

Для тормозных потерь

$$\alpha_{mt} = (-2\varepsilon + \sigma_{t1} + \sigma_{t2}) \left\{ (\sigma - \sigma_0) + \frac{1}{\sigma_{t2} - \sigma_{t1}} \cdot \left[\sigma_{t1}^2 \cdot \ln \frac{\sigma_{t1} + \sigma}{\sigma_{t1} + \sigma_0} - \sigma_{t2}^2 \cdot \ln \frac{\sigma_{t2} + \sigma}{\sigma_{t2} + \sigma_0} \right] \right\} \quad (485)$$

В абсолютных величинах потерянная в роторе энергия при пуске

$$A_{2p} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} \cdot 4(1 + \varepsilon) \cdot s_m \cdot \frac{M_{\max}}{M_m} \left[(s - 1) - \frac{s^2 p_1}{s_{p2} - s_{p1}} \cdot \ln \frac{s - s_{p1}}{1 - s_{p1}} + \frac{s^2 p_2}{s_{p2} - s_{p1}} \cdot \ln \frac{s_{p2} - s}{s_{p2} - 1} \right] \quad (486)$$

При торможении

$$A_{2t} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} \cdot 4(1 + \varepsilon) \cdot s_m \cdot \frac{M_{\max}}{M_m} \left[(s - 1) + \frac{s^2 t_1}{s_{t2} - s_{t1}} \cdot \ln \frac{s_{t1} + s}{s_{t1} + 1} - \frac{s^2 t_2}{s_{t2} - s_{t1}} \cdot \ln \frac{s_{t2} + s}{s_{t2} + 1} \right] \quad (487)$$

Так как в асинхронном двигателе ток статора является почти в полной мере отражением тока ротора, то суммарные джоулевы потери в статоре и роторе могут быть найдены по формуле

$$A_{12} = \frac{1}{102} \cdot \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \alpha_2 \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) \text{ kWsec}, \quad (488)$$

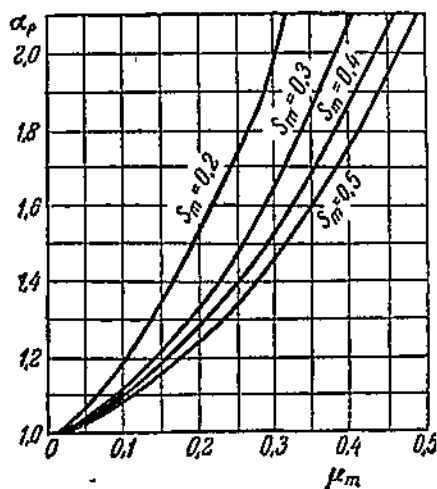
где R_1 — активное сопротивление фазы статора, а R'_2 — приведенное к числу витков статора сопротивление фазы ротора.

Равенство (488) показывает, что увеличение роторного сопротивления R'_2 не влияет вообще на потери в цепи ротора, уменьшает статорные потери. В соответствии с этим иногда при переменном режиме работы оказывается целесообразным брать короткозамкнутые двигатели с увеличенным сопротивлением ротора, т. е. с повышенным скольжением.

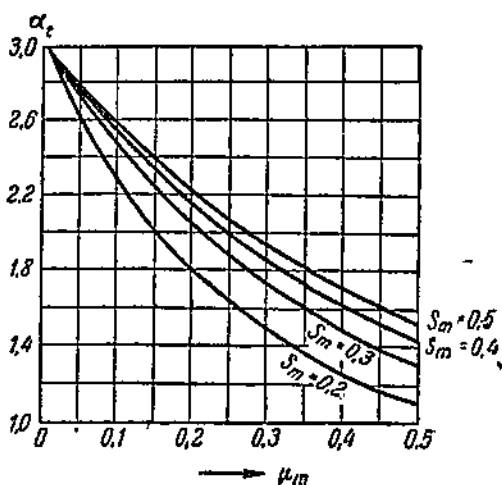
На фиг. 232, 233 представлены для различных значений s_m кривые α_p и α_t для пуска и торможения в зависимости от μ_m .

Учитывая, что эти кривые являются гиперболами, Булгаков дает для потерь формулы

$$A_{2p} = \frac{M_{\max} + (0,8\varepsilon - 0,28) M_m}{M_{\max} - \left(0,6 + \frac{0,22}{s_m} \right) M_m} \cdot \frac{J \cdot \omega_0^2}{2}, \quad (489)$$



Фиг. 232. Кривые потерь энергии при пуске в относительных единицах.



Фиг. 233. Кривые потерь энергии при торможении в относительных единицах.

$$A_{24} = \frac{M_{\max} - (0,8s - 0,28)M_m}{M_{\max} + \left(0,8 + \frac{0,5}{s_m}\right)M_m} \cdot \zeta \cdot \frac{J \cdot \omega^3 \theta}{2} \quad (490)$$

78. Динамическое торможение электроприводов с асинхронными двигателями

Для решения вопросов о переходных режимах асинхронного двигателя при динамическом торможении необходимо использовать выражения для вращающего момента машины, приведенные в п. 40. Подставляя равенство (234) в уравнение движения электропривода, мы можем найти время торможения и закон изменения скорости во времени. По последнему могут быть построены кривые M_d , $I = f(t)$.

Получим сначала время торможения электропривода вхолостую для более общего случая с добавочным сопротивлением в роторе R_d . Уравнение электропривода для этого случая будет иметь вид (234)

$$\frac{3 \cdot p I_2^{r2} (R + R_d)}{9,81 \cdot 2\pi} \cdot \frac{f}{(50b)^2 (R + R_d)^2 + f^2 (1 + bx)^2} = - \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (491)$$

где $f = \frac{pn}{60}$. Заменяя в (491) f через n и интегрируя в пределах от n_1 до n_2 , получим время торможения [Л. 83—84]

$$t_{12} = 3,29 \cdot \frac{GD^2}{p^2 I_2^{r2}} \left[(50b)^2 (R + R_d)^2 \cdot \ln \frac{n_1}{n_2} + \frac{p^2 (1 + bx)^2}{7200 (R + R_d)} (n_1^2 - n_2^2) \right] \quad (492)$$

В случае подстановки в формулу (492) конечного числа оборотов в минуту $n_2=0$ время торможения получается равным бесконечности. Поэтому практически конечное число оборотов в минуту n_2 в этом случае приходится принимать равным $0,05 n_1$. В случае короткозамкнутого двигателя величина добавочного сопротивления $R_d=0$.

Рассматривая случай двигателей с кольцами, выясним величину наивыгоднейшего сопротивления ротора, при котором торможение достигается в кратчайший срок. Для этого возьмем производную $\frac{dt}{d(R+R_d)}$ от (492) и приравняем ее нулю.

При этом при исходной частоте f_1 получим

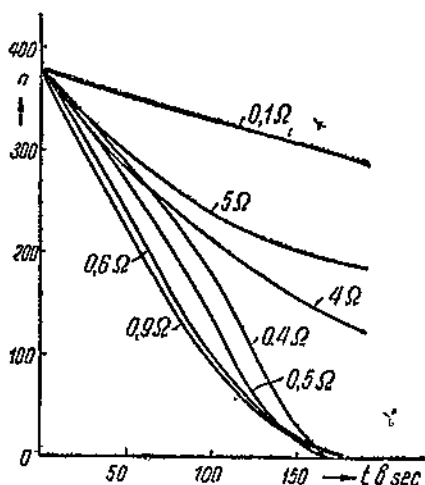
$$(R+R_d)_0 = \frac{f_1(1+bx)}{50 \cdot b \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3}{\ln \frac{n_1}{n_2}}}. \quad (493)$$

Принимая опять $n_2=0,05n_1$, найдем

$$(R+R_d)_0 \approx \frac{f_1(1+bx)}{50b\sqrt{6}}. \quad (494)$$

При этом наименьшее время торможения получается равным

$$t_{12} \min = \frac{GD^2b(1+bx)}{1,79 \cdot p^2 \cdot I_3^2} \left[\frac{2760}{2,3} \cdot f_1 \cdot \ln \frac{n_1}{n_2} + \frac{p^2}{f_1} (n_1^2 - n_2^2) \right]. \quad (495)$$



Фиг. 234. Кривые торможения мощного асинхронного двигателя.

На фиг. 234 показаны кривые торможения мощного асинхронного двигателя. Вычисление необходимого для торможения намагничивающего тока было дано в п. 40. Численный пример расчета торможения дан в [Л. 83 — 84].

При наличии статического момента того или иного вида на валу электропривода общий интеграл оказывается очень сложным. В этом случае приходится прибегать к приближенному интегрированию по участкам. Характер подсчетов зависит от закона изменения статического момента.

Касьяновым [Л. 83] даны следующие приближенные формулы для подсчета времени динамического торможения. Беря случай наивыгоднейшего сопротивления ротора, он (с учетом насыщения)

получает для времени торможения мощных асинхронных двигателей при постоянном токе возбуждения I_m равном номинальному току статора $I_{N\sigma}$, величину

$$t_1 = \frac{GD^2 \cdot n_N^2}{210 \cdot P_N} \text{ секунд.} \quad (496)$$

Для короткозамкнутых асинхронных двигателей при $I_m = 2I_{\sigma N}$ ориентировочно

$$t_1 = \frac{GD^2 \cdot n_N^2}{(100 + 250) \cdot P_N} \text{ секунд.} \quad (497)$$

Несколько иной способ подсчета времени торможения с использованием упрощенного уравнения Клосса дан Голованом.

Коснемся кратко величины потерь в роторе при динамическом торможении. Очевидно, что израсходованная в роторе электрическая энергия при холостом ходе привода всецело покрывается его маховыми массами. Следовательно, потери в роторе за время торможения вхолостую равны, как и при пуске, живой силе электропривода. В короткозамкнутых двигателях можно считать также, что потери в статоре при динамическом торможении равны примерно таковым потерям при пуске. Поэтому для подсчетов мощности двигателя полные потери при динамическом торможении можно принимать равными полным потерям при пуске.

79. Особенности рекуперативного торможения в обыкновенных и многоскоростных короткозамкнутых двигателях и краткое сопоставление разных методов торможения

Рекуперативное торможение может осуществляться как в односкоростных, так и многоскоростных двигателях.

В односкоростных двигателях оно применяется почти исключительно при спуске грузов для создания необходимой скорости спуска посредством тормозного генераторного момента. В многоскоростных двигателях оно применяется в случае торможения с высшей скорости (меньшего числа полюсов) до низшей скорости, соответствующей большему числу полюсов, после чего двигатель переводится для дальнейшего торможения на противовключение. Для решения задач о переходных режимах асинхронной машины в генераторном режиме может быть также использовано уравнение Клосса в форме

$$M_g = \frac{M_{\max}^t \cdot 2(1 + \epsilon)}{\frac{s}{s'_m} + \frac{s'_m}{s} - 2\epsilon} \quad (210)$$

При этом, как уже отмечалось в п. 39 при рассмотрении механических характеристик, максимальный генераторный момент M_{\max}^t

при неизменном напряжении на зажимах двигателя больше максимального двигательного момента за счет влияния падений напряжения в первичных сопротивлениях:

$$\frac{M_{\max g}}{M_{\max d}} = \frac{R_1 + \sqrt{xc^2 + R_1^2}}{R_1 - \sqrt{xc^2 + R_1^2}}. \quad (212)$$

При этом нужно иметь в виду, что ошибка, получаемая из-за пренебрежения падением напряжения от намагничивающего тока, в генераторном режиме больше, чем в двигательном.

Решение уравнений движения электропривода для рекуперативного режима аналогично решению для двигательного режима. Так, если мы возьмем случай холостого хода, то уравнение движения электропривода в абсолютных величинах получит вид

$$\frac{M_{\max g} (2 + 2\varepsilon)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} - 2\varepsilon} = - \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{ds}{dt}, \quad (498)$$

откуда

$$\begin{aligned} dt &= - \frac{1}{2(1+\varepsilon)} \cdot \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0 \cdot s_m}{M_{\max g}} \left(\frac{s}{s_m^2} + \frac{1}{s} - \frac{2\varepsilon}{s_m} \right) \cdot ds = \\ &= - \frac{1}{2(1+\varepsilon)} \cdot Q' \left(\frac{s}{s_m^2} + \frac{1}{s} - \frac{2\varepsilon}{s_m} \right) \cdot ds. \end{aligned}$$

Интегрируя в пределах от $s_{\text{нач}}$ до $s_{\text{кон}}$, получим

$$\frac{t}{Q'} = \frac{1}{2(1+\varepsilon)} \left[\frac{s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2}{2s_m^2} + \ln \frac{s_{\text{нач}}}{s_{\text{кон}}} - \frac{2\varepsilon}{s_m} (s_{\text{нач}} - s_{\text{кон}}) \right] \quad (499)$$

или в относительных единицах

$$\tau = \frac{1}{2(1+\varepsilon)} \left[\frac{\sigma_{\text{нач}}^2 - \sigma_{\text{кон}}^2}{2} + \ln \frac{\sigma_{\text{нач}}}{\sigma_{\text{кон}}} - 2\varepsilon (\sigma_{\text{нач}} - \sigma_{\text{кон}}) \right]. \quad (500)$$

Для определения практических времен торможения в равенствах (499) и (500) конечные значения скольжения следует принимать равными ($-0,05$) в равенстве (499) и $\left(-0,05 \frac{1}{s_m}\right) = -0,05\sigma_0$ в равенстве (500). Как и в режиме противовключения, зависимость τ от σ также может быть выражена семейством кривых, параметром которых будет s_m . Построив кривые, можно быстро производить необходимые для практики привода расчеты. Решение уравнения движения привода при $M_m = \text{const}$ одинаково с таковым для двигательного режима и режима противовключения с заменой $(+2\varepsilon)$ на (-2ε) .

Здесь, так же как и в режиме противовключения, при увеличении опрокидывающего скольжения s_m , достигаемого увеличением активного сопротивления роторной цепи, при рекуперативном

режиме время торможения до некоторого предела падает, после чего опять начинает увеличиваться. Отсюда опять-таки вытекает целесообразность применения в ряде случаев повторно-кратковременного режима двигателей с повышенным скольжением.

Для определения потерь энергии в роторе при рекуперативном торможении ограничимся рассмотрением режима холостого хода, наиболее благоприятного в отношении отдачи энергии. Для этого воспользуемся равенством (448).

Энергия, потерянная в роторе за время рекуперации t_r ,

$$A_{\text{вт}} = \int_0^{t_r} M_d \cdot \omega_0 \cdot s \cdot dt = \int_0^{t_r} J \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega_0 \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot dt = J \left[\omega_0 \cdot \omega - \frac{\omega^2}{2} \right]_{\omega_0}^{\omega_x},$$

где ω_x — исходная скорость привода. Откуда

$$A_{\text{вт}} = J \left(\omega_0 \cdot \omega_x - \frac{\omega_x^2}{2} - \frac{\omega_0^2}{2} \right). \quad (501)$$

Рассмотрим частный случай двигателя с переключением полюсов при соотношении скоростей $\omega_{01} : \omega_{02} = 2$. В таком случае $\omega_x \approx \omega_{01} = 2\omega_{02}$; $\omega_0 = \omega_{02}$

$$A_{\text{вт}} = J \left(2\omega_{02}^2 - \frac{4\omega_{02}^2}{2} - \frac{\omega_{02}^2}{2} \right) = J \frac{\omega_{02}^2}{2}. \quad (502)$$

Отсюда следует, что потерянная в этом случае в роторе энергия равна запасаемой системой при скорости ω_{02} живой силе, т. е. равна потерям в роторе при пуске привода до скорости ω_{02} . Очевидно, что суммарные потери в меди статора и ротора будут равны

$$A_{\text{вт}\Sigma} = J \cdot \frac{\omega_{02}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right). \quad (503)$$

Отданная во время рекуперации электроприводом живая сила будет равна

$$\Delta A = \frac{J\omega_{01}^2}{2} - \frac{J\omega_{02}^2}{2} = \frac{4 \cdot J\omega_{02}^2}{2} - \frac{J\omega_{02}^2}{2} = \zeta \cdot \frac{J\omega_{02}^2}{2}.$$

Следовательно, рекуперированная энергия будет равна

$$\Delta A_r = \zeta \cdot \frac{J\omega_{02}^2}{2} - \frac{J\omega_{02}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = \frac{J\omega_{02}^2}{2} \left(2 - \frac{R_1}{R_2'} \right). \quad (504)$$

Таким образом возвращенная в сеть энергия зависит от отношения $\frac{R_1}{R_2'}$. Так как потерянная в роторе энергия от R_2' не зависит, то опять-таки с относительным увеличением R_2' будет уменьшаться расход энергии электропривода.

Предельное отрицательное скольжение, при котором будет прекращаться рекуперация, и машина, работая тормозом, будет потреблять энергию из сети, зависит от параметров машины и величины медных потерь в статоре.

При статическом моменте M_m , не равном нулю, количество рекуперированной энергии будет еще меньше за счет производства механической работы. Соответственно изменятся и потери в статоре и роторе.

В заключение дадим краткое сопоставление разных способов торможения короткозамкнутых двигателей.

При сопоставлении различных способов электрического торможения асинхронных двигателей должны быть учтены несколько факторов: 1) быстрота торможения; 2) плавность торможения; 3) расход энергии на торможение и обусловленное им нагревание двигателя; 4) простота компоновки схемы управления.

Анализ указанных моментов приводит вообще к следующему заключению. Необходимая интенсивность торможения практически может быть получена во всех рассмотренных способах. При противовключении она может быть достигнута применением двигателей с повышенным скольжением, т. е. с большим сопротивлением ротора, а также повышением приложенного к двигателю напряжения.

Отметим еще раз, что двигатели с повышенным скольжением Бушера и глубоким пазом имеют меньшие потери энергии при торможении и дают нужное торможение в минимальное время. Те же самые результаты могут быть достигнуты при динамическом торможении увеличением постоянного тока. Вместе с тем использование динамического торможения дает возможность иметь большее число включений двигателя в час, чем противовключение в силу меньших потерь в меди.

Из предыдущего видно, что в случае торможения короткозамкнутого двигателя вхолостую потери в цепи двигателя при динамическом торможении в три раза меньше, чем при торможении противовключением [равенство (450)]. Следовательно, двигатель, работающий непрерывно в режимах пуска и торможения вхолостую при торможении противовключением при допустимом нагреве должен иметь в два раза меньшее число включений, чем при динамическом торможении. Кроме того динамическое торможение, давая нужную быстроту, снижает в сети толчки тока.

При указанных преимуществах динамическое торможение обладает двумя недостатками: необходимостью в постоянном токе и несколько более многочисленной автоматической аппаратурой. Торможение противовключением в отношении аппаратуры предъявляет лишь одно специфическое требование — отключение двигателя при достижении нулевой скорости.

В случае многоскоростных короткозамкнутых двигателей возможно применение рекуперативного торможения. Как перед противовключением, так и перед динамическим торможением этот

способ торможения имеет преимущество в отношении меньшего расхода энергии, а перед динамическим кроме того в отношении отсутствия необходимости в постоянном токе. Двигатель с повышенным скольжением помогает уменьшить время торможения и здесь. К недостаткам нужно отнести сложность схемы, значительные толчки тока и невозможность торможения до нулевой скорости.

80. Выбор рационального номинального скольжения короткозамкнутых двигателей в электроприводах с пульсирующей нагрузкой

При работе электропривода с пульсирующей и ударной нагрузкой возникает естественный вопрос о выборе рациональных значений махового момента электропривода и величины номинального скольжения в нем. Выше этот вопрос был частично рассмотрен применительно к двигателям с кольцами на прокатных reversing станках. Здесь мы коснемся его применительно к короткозамкнутым асинхронным двигателям. Указанная задача в практике обычно именуется задачей выбора короткозамкнутого двигателя с повышенным номинальным скольжением. Нормальные короткозамкнутые двигатели имеют скольжение всего в 2—3%. В ряде электроприводов оказывается целесообразным применять двигатели со скольжением в 10—14%. В соответствии с требованиями наших промышленных предприятий динамостроительные заводы СССР изготовили некоторое количество таких двигателей. Так, ХЭМЗ им. Сталина для Горьковского автозавода изготовил в свое время некоторое количество таких двигателей типа МТС мощностью от 5,2 kW до 30 kW с повышенным номинальным скольжением от 9 до 10,5%. Первые образцы таких двигателей мощностью от 13,5 до 30 kW с номинальным скольжением от 10 до 14% были выпущены также заводом „Вольта“. Ныне соответствующие двигатели типа АДС изготавливаются заводом „Электросила“.

Нужно отметить, что заграничная практика не дает единого ответа на вопрос о целесообразности применения двигателей с повышенным скольжением. Так американская фирма GEC рекомендует короткозамкнутые двигатели с $s = s_N = 10—15\%$ для электропривода таких машин, как кузнечно-ковочные машины, молоты, штамповочные станки и т. д., отмечая, что применение двигателей с повышенным скольжением целесообразно для перечисленных машин при числе ударов исполнительного механизма не выше 25 в минуту. Фирма AEG для ткацкого станка также считала целесообразным устанавливать двигатель с повышенным скольжением, фирмы SSW и BBC для рассматриваемого случая не видели особых преимуществ этого типа двигателя.

Ответ на вопрос о наиболее рациональном скольжении короткозамкнутого двигателя зависит от специфических свойств ис-

полнительного механизма и может быть разрешен лишь детальным теоретико-экспериментальным изучением нагрузочных диаграмм для разных скольжений. Общее решение вопроса невозможно, так как должна быть учтена экономическая сторона дела, т. е. более высокая стоимость двигателей с повышенным номинальным скольжением, иной эксплуатационный к. п. д.

Попытка решения вопроса в общем случае была сделана Гейлером [Л. 129]. Если принять статический момент рабочей машины изменяющимся синусоидально, то для момента двигателя при принятии прямолинейности механической характеристики мы получим также синусоидальное изменение. Кривая $M_d = f(t)$ будет отличаться от $M_m = \varphi(t)$ лишь амплитудой. Амплитуда M_d будет тем меньше, чем больше электромеханическая постоянная привода B , т. е. будет тем меньше, чем больше будет GD^2 и s_N . Кроме того кривая $M_d = f(t)$ будет сдвинута относительно кривой $M_m = f(t)$ по фазе тем больше, чем больше B :
при

$$M_m = M_m + M_1 \cdot \sin at, \quad (323)$$

$$\omega = A - C \cdot \sin(at - \arctg aB). \quad (332)$$

Наилучшим графиком Гейлер предлагает считать такой, при котором получится наибольшее использование маховых масс. При этом мы будем иметь наименьшие потери в меди ротора, а стало быть (для большего числа случаев) и наименьший расход энергии за один цикл работы исполнительного механизма.

Обозначая максимальное скольжение за цикл s_{\max} и минимальное s_{\min} , мы можем написать выражение для отдаваемой живой силы за цикл

$$\Delta A = \frac{GD^2}{7200} (n_{\max}^2 - n_{\min}^2) = \frac{GD^2 \cdot n_0^2}{7200} [(1 - s_{\max})^2 - (1 - s_{\min})^2]. \quad (505)$$

Обозначая среднее скольжение $s_m = \frac{s_{\max} + s_{\min}}{2}$ и производя преобразования в (505), получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta A &= \frac{GD^2 \cdot n_0^2}{7200} \cdot (s_{\max} - s_{\min}) \cdot (2 - s_{\max} - s_{\min}) \approx \\ &\approx \frac{GD^2 \cdot n_0}{3600} \cdot (s_{\max} - s_{\min}) (1 - s_m). \end{aligned} \right\} \quad (506)$$

$$\text{Так как } s_m = M_m \cdot \frac{s_N}{M_N}$$

$$\text{и } (s_{\max} - s_{\min}) = (M_{\max} - M_{\min}) \cdot \frac{s_N}{M_N},$$

то

$$\Delta A = \frac{GD^2 \cdot n_0^2 \cdot s_N}{3600 \cdot M_N} \cdot (M_{\max} - M_{\min}) (1 - \frac{M_m}{M_N} s_N). \quad (507)$$

Гейлер, исходя из средних практических цифр отношения номинального момента двигателя M_N к среднему моменту пульсирующей нагрузки M_m и производя ряд выкладок, приходит к формуле для наивыгоднейшего скольжения, находя максимум ΔA по s_N и приравнявая его нулю. При этом

$$(s_N)_{opt} = 12 \cdot M_N \cdot \sqrt[3]{\frac{B^2}{(GD^2)^2 \cdot n^2 \cdot M_m}} \quad (503)$$

Инж. Калялов предлагает определять оптимальное скольжение асинхронного привода с маховыми массами, исходя из минимума потерь. Такой выбор должен обеспечить минимальный расход энергии в электроприводе на единицу продукции.

81. Допустимое число включений в час короткозамкнутых двигателей при повторно-кратковременном режиме работы

В практике последнего времени короткозамкнутые двигатели начинают находить все более и более широкое распространение для повторно-кратковременного режима работы. Наиболее типичным в смысле максимальной потребной частоты циклов в час являются металлорежущие станки, в отдельных типах которых число включений в час доходит до 2 000—4 000. Характерными примерами использования короткозамкнутых двигателей большей мощности с несколько меньшей частотой включений можно считать лифты и краны.

Условия работы короткозамкнутых двигателей в повторно-кратковременном режиме оказываются естественно более тяжелыми, чем для двигателей постоянного тока или асинхронных с кольцами. Во время переходных режимов короткозамкнутых двигателей (пуск и торможение) в роторной клетке двигателя должно быть поглощено значительное количество тепла. В двигателях, пускаемых под реостатом, это тепло делится между медью якоря (ротора) и добавочными сопротивлениями. В короткозамкнутом двигателе последние отсутствуют, и все тепло должно быть целиком рассеяно в роторе. Это обстоятельство обуславливает большие трудности конструирования короткозамкнутых двигателей для повторно-кратковременного режима работы. Соответствующая серия двигателей должна обладать некоторыми специфическими качествами по сравнению с двигателями длительного режима. Помимо усиления механической прочности, уменьшения махового момента — условий, обязательных для повторно-кратковременного режима работы, — эти двигатели должны конструироваться по возможности с малым пусковым током и повышенным скольжением. На такие условия приходится идти даже за счет ухудшения к. п. д. и $\cos \phi$. В связи с этим приобретают особое значение двигатели Бушера с глубоким пазом. Нашими заводами в отношении конструирования короткозамкнутых двигателей для повторно-

кратковременного режима сделано далеко не достаточно. Соответствующая задача довольно остро стоит в порядке дня. Поэтому в настоящее время нам часто приходится выяснять, допускает ли короткозамкнутый двигатель, применяемый для привода того или другого механизма, необходимое число включений в час. Из-за отсутствия соответствующей серии в изготовлении заводов СССР мы не имеем по этому вопросу пока в каталогах на двигатели никаких указаний.

Решение вопроса о допустимом числе включений в час короткозамкнутого двигателя должно вытекать из рассмотрения законов изменения тока и скорости в переходных режимах на основании анализа уравнения движения электропривода. Учет изменения указанных величин дает возможность подсчета потерь в двигателе и сопоставления средних потерь обслуживаемого цикла с нормальными потерями двигателя выбранного габарита.

Принципиально наиболее точным для данного случая следует считать метод средних потерь. Целесообразность его применения простирается прежде всего из того, что в некоторых режимах, в первую очередь в режиме противовключения, сильно возрастают железные потери в роторе и добавочные. Однако практическое определение законов изменения указанных потерь вне электромашиностроительных заводов и лабораторий представляет большие, если не непреодолимые трудности. Вместе с тем подсчеты и опыт показывают, что величина этих потерь в переходных режимах в большинстве случаев составляет 2—3%, и стало быть ими можно пренебречь.

В таком случае мы приходим по существу к несколько видоизмененной форме метода эквивалентного тока, примененного одновременно к статорной и роторной цепи. Это усложнение обусловлено сильным взаимным температурным влиянием статора и ротора и некоторыми особенностями изменения роторных медных потерь. Дело в том, что в пределах скольжения от $s=0$ до $s=1$ потери в меди статора изменяются примерно пропорционально потерям в меди ротора. При изменении же скольжения от $s=1$ до $s=2$ потери в меди ротора возрастают значительно, чем потери в меди статора. Это обуславливает увеличенное нагревание ротора по сравнению со статором. Соотношение медных потерь в статоре и роторе уже не может быть связано каким-либо постоянным коэффициентом. Особо большое значение этот вопрос имеет для двигателей с переменными параметрами. При практическом решении задачи приходится по существу учитывать суммарно средние медные потери статора и ротора за цикл и сопоставлять их с суммарными медными потерями в статоре и роторе при нормальном режиме двигателя.

Точный учет законов изменения статорного и роторного тока может быть произведен лишь при условии пользования детальными нагрузочными диаграммами. Попытки учета пусковых и тормозных токов при переходных режимах посредством введе-

ния среднего пускового или тормозного тока для статора и ротора могут дать большие ошибки из-за криволинейного характера изменения тока, далеко не одинакового для разных типов двигателей при разных законах изменения статического момента.

Для решения вопроса должны быть вычислены суммарные потери переходных режимов в статоре и в роторе по формулам (484), (488) или (503) или по аналогичным формулам. Пусть длительность пуска привода будет t_1 при потерях за этот период (в kWsec) a_{s1} и a_{r1} , длительность работы при установившемся режиме t_2 при потерях a_{s2} и a_{r2} , длительность торможения t_3 при потерях a_{s3} и a_{r3} . В таком случае средние потери (в kW) за цикл будут

$$q_m = \frac{\sum_0^{t_1} (a_{s1} + a_{r1}) + \sum_{t_1}^{t_2} (a_{s2} + a_{r2}) + \sum_{t_2}^{t_3} (a_{s3} + a_{r3})}{t_2} \quad (509)$$

При проверке двигателя на нагрев мы должны убедиться в том, что средние потери за цикл равны или во всяком случае не более допустимых потерь за цикл q_d .

Эти допустимые потери

$$q_d = q_N \cdot \frac{\alpha(t_1 + t_2 + t_3) + t_0}{\alpha(t_1 + t_2 + t_3)}, \quad (510)$$

где q_N — медные потери в статоре и роторе двигателя при номинальной нагрузке; t_0 — время паузы за цикл $t_2 = t_1 + t_2 + t_3 + t_0$. Коэффициент α учитывает ухудшение охлаждения двигателей во время остановки, пуска и торможения. Величина его зависит от типа и конструкции двигателя. Для грубых подсчетов можно принимать $\alpha = 3$.

Во многих случаях переходных режимов ротор перегревается сильнее статора. При этом целесообразнее с запасом сделать проверку на нагрев по средним потерям ротора. Совершенно естественно, что повышение нагрева ротора будет обуславливать и повышение нагрева статора. Степень этого повышения с полной точностью может быть установлена лишь детальным исследованием двигателя или указаниями соответствующего электромашиностроительного завода. Обычно такой метод проверки по роторным потерям дает некоторый небольшой запас в мощности двигателя при проверке по роторным потерям

$$q_{ur} = \frac{\sum_0^{t_1} a_{s1} + \sum_{t_1}^{t_2} a_{r2} + \sum_{t_2}^{t_3} a_{s3}}{t_2} = q_{dr} = q_{Nr} \cdot \frac{\alpha \cdot t_p + t_0}{\alpha \cdot t_p} \quad (511)$$

Определение средних потерь двигателя за цикл позволяет найти допустимое число включений в час Z . Так как $t_2 \cdot Z = 3600$ сек., то согласно предыдущему при $t_1 + t_2 + t_3 = t_k$

$$\frac{(q_m \cdot t_2) \cdot Z}{3600} = q_N \cdot \frac{\alpha \cdot t_k + t_0}{\alpha \cdot t_k} = q_N \cdot \frac{\alpha t_k + \frac{3600}{Z} - t_k}{\alpha \cdot t_k}$$

откуда

$$Z = \frac{3600}{\alpha} \cdot \frac{q_N}{q_m \cdot t_z} \left(\frac{\alpha - 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{\alpha - 1}{2} \right)^2 + \frac{\alpha \cdot q_m \cdot t_z}{q_N \cdot t_k}} \right). \quad (512)$$

Проф. С. А. Прессом [Л. 131] предложен другой упрощенный способ определения допустимого числа включений в час различных короткозамкнутых двигателей, базирующийся на среднем пусковом и среднем тормозном токе двигателя.

В заключение напомним, что в том случае, когда двигатель один работает непрерывно вхолостую в режимах пуска и торможения без установившегося состояния и без остановки, то число допустимых включений в час будет различно при разных способах торможения. Если при чисто механическом торможении число включений в час будет Z , то при динамическом торможении оно будет $\frac{Z}{2}$ и при торможении противовключением $\frac{Z}{4}$. Причины

этого обстоятельства, протекающие из соотношения потерь, были изложены выше. Наличие махового момента механизма уменьшает допустимое число включений в час в отношении $\frac{GD_d^2}{GD_d^2 + GD_m^2}$.

Наличие статического момента также уменьшает допустимое число включений, однако подсчет этого уменьшения более сложен и зависит естественно от характера статического момента [Л. 130].

§ 82. Особенности переходных режимов электроприводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями при переменной частоте

В ряде электроприводов с короткозамкнутыми двигателями оказывается целесообразным вести регулировку их скорости изменением частоты. В качестве типичных примеров можно указать на электроприводы неререверсивных рольгангов, рогулечных ватров, деревообрабатывающих станков. Обоснование целесообразности этого способа регулировки скорости для некоторых электроприводов будет дано далее в гл. VII. Здесь же мы коснемся лишь особенностей переходных режимов короткозамкнутых двигателей для такого способа регулирования.

Произведенный проф. М. П. Костенко [Л. 134] на базе круговой диаграммы анализ работы асинхронного двигателя при переменной частоте приводит к заключению, что для получения в ненасыщенной машине при всех скоростях неизменного коэффициента устойчивости, т. е. отношения $M_{\max}:M_m$, неизменного $\cos \varphi$, постоянного абсолютного скольжения и неизменного к. п. д., зависящего лишь от регулирования частоты, а не от нагрузки на валу, необходимо изменять напряжение на зажимах машины по закону

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1} \cdot \sqrt{\frac{M_{sm}}{M_{1m}}} \quad (513)$$

При $M_m = \text{const}$, очевидно

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1}$$

При вентиляторном моменте, т. е. при $M_m = c \cdot n^3 = c' \cdot f^3$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2^2}{f_1^2}$$

На практике рассматриваемые электроприводы чаще применяются при $M_m = \text{const}$. Поэтому напряжение на зажимах короткозамкнутых двигателей при регулировке в таких случаях меняется пропорционально частоте. При этом магнитный поток двигателя $\Phi \equiv \frac{U}{f}$ при всех скоростях будет оставаться постоянным, а насыщение машины будет неизменным. Стало быть неизменными будут и коэффициенты самоиндукции статорной и роторной обмоток.

Выясним кратко для поставленных выше условий влияние изменения частоты на пусковой и максимальный момент короткозамкнутого двигателя. Пусковой момент, как известно, может быть выражен равенством

$$M_{pp} = \frac{c \cdot I_2^2}{f}$$

Так как

$$I_2 = \frac{E_{20} \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + x_2^2 s^2}}$$

то в случае пуска при $s=1$ и при $E_{20} = c' f \cdot \Phi$

$$M_{pp} = \frac{c \cdot E_{20}^2}{R_2^2 + x_2^2} \cdot \frac{1}{f} = \frac{c \cdot c'^2 \cdot f^2 \cdot \Phi^2}{R_2^2 + x_2^2} \cdot \frac{1}{f} = k \cdot \frac{f}{R_2^2 + x_2^2},$$

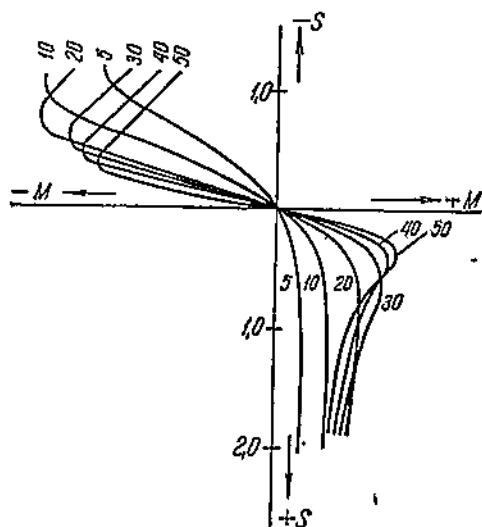
откуда пусковой момент при частоте f

$$M_{ppf} = M_{pp50} \cdot \frac{R_2^2 + x_2^2_{50}}{R_2^2 + x_2^2_f} \cdot \frac{f}{50}, \quad (514)$$

где M_{pp50} — пусковой момент при частоте в 50 Hz.

Из равенства (514) видно, что уменьшение частоты в рассматриваемых условиях ведет к уменьшению пускового момента. Это уменьшение происходит за счет уменьшения активного тока, не компенсируемого увеличением $\cos \varphi$. При малых частотах зависимость между M_{pp} и f идет по закону прямой линии, далее момент начинает расти медленнее частоты.

По тем же причинам с уменьшением частоты происходит уменьшение и максимального момента, причем с понижением частоты максимум перемещается в сторону больших скольжений, иногда переходя в режим противовключения. Опрокидывающее скольжение при уменьшении частоты возрастает. На фиг. 235 представлены зависимости вращающего момента некоторого двигателя от скольжения для разных частот. Обратите внимание, что



Фиг. 235. Зависимость момента от скольжения для разных частот.

с уменьшением частоты опрокидывающее скольжение двигателя увеличивается, а максимальный момент уменьшается. Причиной этого обстоятельства является уменьшение магнитного потока, вызванное тем, что активное падение напряжения в статорной обмотке двигателя при уменьшении частоты снижается существенно меньше, чем приложенное напряжение.

По указанным только что причинам в электроприводах с регулировкой скорости проверка пускового момента двигателя должна производиться при наименьшей частоте. В ряде случаев для повышения пускового момента двигателей прибегают к повышению напряжения на их зажимах в период пуска. В свою очередь при $M_m = \text{const}$ сумма потерь в меди и железе двигателя растет с увеличением частоты, так как потери от активного тока остаются постоянными, а потери железные и медные от реактивного тока растут примерно пропорционально частоте. Поэтому с точки зрения нагрева двигатель должен быть рассчитан на наибольшую частоту. Далее с понижением частоты уменьшается запасаемая в электроприводе живая сила $A = J \frac{\omega^2}{2}$.

Поэтому при меньшей предельной частоте двигатель должен допускать большее число пусков в час.

Рассмотрение работы электроприводов при переменной частоте дано [Л. 135—138]. В силу того, что в случае разгона или торможения при переменной частоте механические характеристики $M_d = f(s)$ двигателя непрерывно меняются (фиг. 235), для решения

задач о переходных режимах возможно применение лишь графического интегрирования.

Вопрос усложняется еще тем обстоятельством, что задаваемый в установке закон изменения частоты практически по существу не связан с теми или иными характеристиками привода.

Графический способ решения задачи разработан инж. Булгаковым [Л. 136] на основе использования метода функциональных шкал проф. Франка.

83. О динамической устойчивости асинхронного двигателя при ударной нагрузке

Вопросы динамической устойчивости асинхронных двигателей имеют весьма важное значение при установке их на исполнительных механизмах, работающих с ударной нагрузкой, в первую очередь на нереверсивных прокатных станах. В этих случаях для наилучшего использования двигателя и во избежание установки чрезмерного маховика желательно оценивать перегрузочную способность двигателя с высокой степенью точности. Это обстоятельство заставило многих наших авторов уделить работе асинхронного двигателя около точки опрокидывания большое внимание [Л. 61—68, 128]. Как уже частично отмечалось нами в п. 39, исследования в этом направлении, преимущественно теоретические, сводились к уточнению выражений для формы кривой вращающего момента, к замене отдельных частей механической характеристики прямыми, параболой, комбинацией прямой и параболы и т. д.

Необходимо прежде всего отметить, что решение уравнения движения электропривода с полным уравнением Клосса вообще должно давать достаточно точные данные и для работы двигателя около точки опрокидывания. Недостатком этого решения является лишь значительная его громоздкость (п. 75). Стремления отдельных авторов сводились преимущественно к тому, чтобы на основе каталожных данных двигателя дать по возможности простое и вместе с тем достаточно точное практически решение. С этой точки зрения отдельные методы могут быть использованы для ориентировочных эпизодических подсчетов.

Не производя здесь сопоставления всех имеющихся различных решений, мы отметим лишь, что многообразие предлагавшихся теоретических методов до экспериментальной проверки вряд ли может быть оправдано, несмотря на всю практическую важность вопроса.

Дальнейшие задачи по изучению этого вопроса должны относиться в первую очередь к экспериментальным исследованиям.

84. О переходных режимах электроприводов с синхронными двигателями

Физические процессы переходных режимов наиболее часто применяемых синхронных двигателей с явно выраженными полюсами отличаются большой сложностью [Л. 88]. По существу здесь можно говорить лишь о рассмотрении электромеханических пере-

ходных режимов. Изложение этого вопроса в полном объеме далеко выходит за пределы данного курса и может излагаться лишь в специальных монографиях. Для целей электропривода имеют значение следующие режимы: 1) пусковой режим двигателя в качестве асинхронного; 2) синхронизирующий процесс (вхождение в синхронизм под влиянием включения в обмотку возбуждения постоянного тока); 3) работа двигателя при пульсирующей нагрузке; 4) режим работы около предельной перегрузки (динамическая устойчивость); 5) динамическое торможение.

Мы ограничимся здесь лишь краткими сведениями о 2 и 4 режимах. Физические процессы первого режима с точки зрения сопоставления различных применяемых схем частично будут рассмотрены далее. Теоретическое рассмотрение пускового режима синхронного двигателя с явно выраженными полюсами дано Линвиллем [Л. 89]. Решение уравнений переходных режимов для динамического торможения дано Кильбурном и Ферри [Л. 90, 147].

В отношении пускового процесса синхронного двигателя в качестве асинхронного здесь отметим лишь одно обстоятельство. Теоретическое рассмотрение пускового процесса на основе эквивалентной схемы Линвилля оказывается весьма сложным и требует знания многочисленных параметров синхронной машины, которыми электроприводчики обычно не обладают. Поскольку в практике привода бывает обычно необходимо знание времен пуска, торможения и получаемых величин ускорений и замедлений, то необходимо, чтобы электромашиностроительные заводы в своих каталогах на синхронные двигатели давали графически характеристики $M=f(s)$ и $I=f(s)$ так же, как даются эти характеристики для серийных и компаундных двигателей постоянного тока.

Имея эти кривые, можно провести расчет механических переходных режимов хотя бы по принципу пропорций или иным графоаналитическим методом, как это делается и в других двигателях.

Наличие реальных кривых $M=f(s)$ и $I=f(s)$ желательно иметь и для режима динамического торможения, когда последний применяется в целях рабочего или аварийного торможения, и когда необходим подсчет длительности тормозного процесса.

Коснемся кратко синхронизирующего процесса синхронного двигателя, начинающегося с момента включения постоянного тока. Упрощенное выражение для вращающего момента двигателя в этот период было дано выше (п. 42)

$$M_d = M_s \cdot \sin \theta + M_{a1} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \zeta \cdot M_s \sin 2\theta \quad (254)$$

Для использования равенства (254) в уравнении движения при-
то целесообразно угол θ выразить в механических радианах α .

Равенство (254) при этом получит вид

$$M_d = M'_s \cdot \sin \alpha + M'_{a1} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \zeta \cdot M'_s \cdot \sin 2\alpha \quad (254')$$

Динамический момент электропривода

$$M_j = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Но скольжение, или, что то же самое, скорость изменения угла θ , выраженная в механических радианах в секунду, будет

$$s\omega_0 = \frac{d\alpha}{dt}$$

Так как

$$\omega = \omega_0(1-s),$$

то

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

Следовательно,

$$M_j = -J \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

Если постоянный статический момент нагрузки обозначить через $M'_{s1} \cdot \rho$, где M'_{s1} — максимальный синхронный момент двигателя, то уравнение движения привода для двигателя с явно выраженными полюсами получает вид

$$J \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} + M'_{s1} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + M'_{s1} \cdot \sin \alpha + \zeta_{s1} M'_{s1} \cdot \sin 2\alpha = \rho \cdot M'_{s1} \quad (515)$$

В двигателе с неявно выраженными полюсами пропадает член, соответствующий реактивному моменту.

Таким образом мы получаем линейное дифференциальное уравнение второго порядка с последним членом и с трансцендентными функциями. Уравнение (515) точно не интегрируется, почему для получения практических суждений приходится прибегать к приближенному решению.

С точки зрения теории электропривода нас в синхронизирующем процессе интересует преимущественно один вопрос. Какие требования должны быть предъявлены к синхронному электродвигателю для того, чтобы последний при заданной нагрузке впал в синхронизм и притом сразу без колебаний. Суждения могут быть сделаны лишь после анализа уравнения (515). Для практических выводов приходится совершенно отказаться от учета реактивного момента в двигателе с явно выраженными полюсами и делать выводы лишь для конструкции с неявно выраженными полюсами. Полученное при этом уравнение (515) (без последнего члена левой части) хотя и интегрируется, но имеет настолько сложный общий интеграл, что о практическом использовании его обычно не может быть и речи. Поэтому практически приходится основываться исключительно на приближенных решениях.

Эти решения определяют:

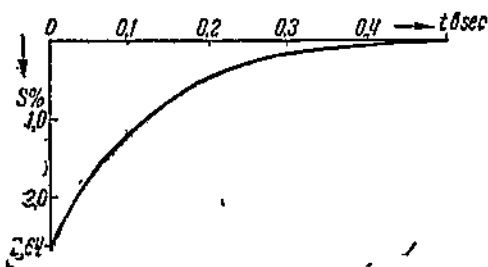
а) необходимую для успешной синхронизации перегрузочную способность синхронного режима машины;

б) то минимальное скольжение, до которого двигатель должен быть доведен одним асинхронным моментом.

При неудачном подборе этих параметров двигатель может не впасть в синхронизм.

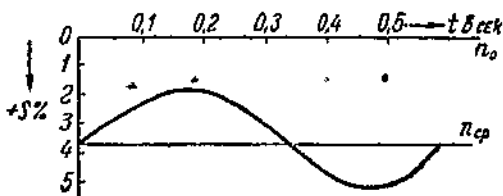
Нужно иметь в виду, что в отношении впадения двигателя в синхронизм существуют два возможных периода включения постоянного тока возбуждения:

1. При $\alpha = 0$. Этот момент времени является наиболее благоприятным для включения, так как друг под другом находятся

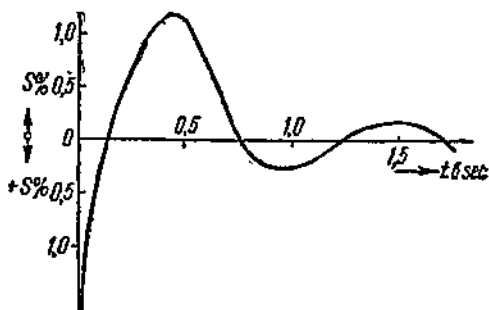


соответствующие (разноименные) полюса статора и ротора, и значительного ускорения двигателя для впадения в синхронизм не требуется.

2. При $\alpha = 180^\circ$. Этот момент времени является наиболее неблагоприятным для синхронизации, так как друг под другом находятся полюса, отталкивающие один другой. В результате этого скольжение двигателя при включении постоянного тока не уменьшается, а возрастает.



На фиг. 236, 237 и 238 представлены три возможных случая изменения скорости двигателя при синхронизирующем процессе.



Фиг. 236. } Изменение скорости синхронного
Фиг. 237. } двигателя при переходе с асин-
Фиг. 238. } хронного режима на синхронный.

Если включение тока возбуждения надлежательной силы произведено в наиболее благоприятный момент, то машина синхронизируется одним толчком (фиг. 236). Скольжение падает до нуля. Если синхронизирующий момент (ток возбуждения)

окажется недостаточным, то машина будет качаться около устойчивой асинхронной скорости, причем колебания вверх и вниз могут быть неодинаковы, согласно фиг. 237. Если, наконец, ток возбуждения окажется чрезмерным, то машина может перейти через синхронную скорость и втянется в синхронизм лишь после нескольких качаний

(фиг. 238). Если включение тока возбуждения произведено в неблагоприятный момент, то машина все-таки может синхронизироваться, но лишь после неопределенного количества колебаний. Литература по вопросам синхронизирующего процесса дана автором в I части «Применение двигателей в промышленности» под № 59—67.

Эджертоном и Фурмарье [Л. 148] был проведен анализ синхронизирующего процесса двигателя с явно выраженными полюсами посредством специального интегратора. Они установили, что синхронизирование получается и при первом толчке в случае включения в самый неблагоприятный момент при условии, что начальное исходное скольжение, до которого двигатель должен дойти под влиянием асинхронного момента

$$s_{\max} < \frac{250}{n_0} \cdot \sqrt{\frac{P_{s\max}}{f \cdot GD^2}}, \quad (516)$$

где

n_0 — синхронное число оборотов в минуту;

$P_{s\max}$ — максимальная синхронизирующая мощность в kW при взятом токе возбуждения;

f — частота переменного тока;

GD^2 — приведенный маховой момент электропривода в кгм².

Равенство (516) и может быть использовано для ориентировочного суждения о ходе синхронизирующего процесса двигателя с явно выраженными полюсами.

85. О нагрузочной диаграмме синхронного двигателя при пульсирующей нагрузке

Из нагрузочных диаграмм и переходных режимов синхронного двигателя наибольший интерес представляет работа двигателя в приводе с пульсирующей нагрузкой. Типичным примером является электропривод синхронным двигателем поршневого компрессора с маховиком. Детальное рассмотрение соответствующих вопросов дано в [Л. 139—147, 245].

86. О динамической устойчивости синхронного двигателя при ударной нагрузке

В современной практике синхронные двигатели в результате усовершенствования их пусковых и рабочих свойств стали широко применяться в приводах, работающих даже при резко пиковых нагрузках.

Наиболее типичным примером последних являются неререверсивные прокатные станы. В подобных приводах иногда требуются

перегрузки, достигающие до 300—350% номинального момента. Так как при переходе за предельную допустимую перегрузку синхронный двигатель будет выпадать из синхронизма, то вопросы динамической устойчивости в этом типе двигателя имеют еще большее значение, чем в асинхронном.

Статическая устойчивость синхронного двигателя, характеризуемая предельным допустимым моментом при постоянном увеличении нагрузки, вообще говоря, ниже динамической устойчивости, т. е. предельной перегрузки при внезапном прикладывании ее к валу двигателя [Л. 1, ч. II, 57; Л. 151]. Трудности точного определения предельной динамической перегрузки часто вели к тому, что проектанты базировались с запасом на статической устойчивости. Теоретико-экспериментальное исследование соответствующего вопроса было произведено инж. ХЭМЗ В. М. Матюхиным [Л. 150]. Большую роль в рассмотрении данного вопроса играют переходные режимы в обмотке возбуждения.

Для решения задачи о поведении двигателя при ударной нагрузке можно использовать то же уравнение движения привода (543), которое нами было написано в предыдущем параграфе для синхронизирующего процесса.

Для учета влияния обмотки возбуждения в уравнение (543) должен быть введен вращающий момент, создаваемый переходными токами статора за счет уравнительных токов в обмотке возбуждения.

Величина статорного уравнительного тока без учета демпфирования находится по характеристике короткого замыкания синхронной машины для соответствующего значения переходного тока в роторе. Опыт показывает, что величина дополнительного уравнительного тока в статоре затухает по экспоненте с постоянной времени, равной электромагнитной постоянной ротора. Выражение дополнительного момента, создаваемого уравнительным током статора, должно быть введено в равенство (515). Получаемое при этом уравнение точно решено быть не может. Решение его может быть получено лишь методом последовательного графического интегрирования или посредством специального интегратора. Рассмотрение получающегося решения приводит к заключению, что динамическая устойчивость синхронных двигателей зависит не от абсолютных величин параметров уравнения (515), а от их соотношений.

Подробный анализ уравнения дает возможность выявить те минимальные критические значения параметров (в частности M_{cr} , $M_s \max$, J , T для ротора), при превышении которых двигатель станет неустойчивым.

Экспериментальное и теоретическое исследование, сделанное Матюхиным, привело его к выводу, что для обеспечения динамической устойчивости синхронного двигателя при мощности не ниже предельной статической, пусковой ток в роторе при

пуске двигателя от номинального напряжения должен быть не ниже 80% номинального тока возбуждения.

Повышение динамической устойчивости синхронных двигателей при ударной нагрузке часто достигается временным автоматическим увеличением тока возбуждения при приближении к моменту удара. В последнее время для этой цели используются схемы с амплидином [Л33', п. 128].

ГЛАВА VI.

РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

87. Значение вопроса о регулировке скорости исполнительных механизмов для современной техники и некоторые определения.

По условиям производственного процесса целый ряд исполнительных механизмов должен работать с различной скоростью. Сюда относятся металлорежущие станки, в которых скорость зависит от сечения снимаемой стружки и сорта обрабатываемого металла. Переменной скорости вращения в различные периоды работы требуют разнообразные прокатные станы. Довольно обычными для многих из них в большинстве случаев является условие, чтобы каждый профиль мог прокатываться при определенной необходимой для него скорости. Повышение скорости против некоторой нормальной для каждого профиля ведет к порче продукта, так как металл не идет в углы калибров прокатных валков, снижение скорости — к уменьшению производительности и увеличению расхода энергии из-за охлаждения металла. Различные скорости требуются для бумагоделательных машин в зависимости от сорта производимой бумаги, для ротационных полиграфических печатных машин — в зависимости от сорта даваемых отпечатков, рода краски и т. д.; для ситцепечатных машин — в зависимости от характера наносимого рисунка, для каландров — в зависимости от обрабатываемой материи. В последних четырех категориях перечисленных механизмов требуется кроме того очень сильное снижение скорости, не непосредственно для самого производственного процесса, а для его подготовки, а именно для предварительной заправки бумаги или ткани.

Таким образом перечисленные исполнительные механизмы и многие другие в связи с изменением производственного процесса или по качеству (род продукта, материал), или по количеству, или, наконец, для выполнения какой-то определенной рабочей операции требуют от двигателей регулярного или нерегулярного периодического вынужденного изменения скорости вращения, не вызываемого непосредственно нагрузкой механизма. Такое изменение скорости двигателей называется регулированием

с к о р о с т и. Это регулирование может производиться через известные промежутки времени, измеряемые иногда минутами, часами, сутками и более (прокатный стан, вентилятор, металлообрабатывающий станок). Иногда же это регулирование может производиться или вообще непрерывно или непрерывно, но лишь в известные промежутки времени (токарные станки, работающие всегда при постоянной скорости резания, кольцевой ватер, накатный аппарат для холодной прокатки ленты, некоторые каландры, вентиляторы дутья и т. п.). Это регулирование часто производится не в зависимости от нагрузки на рабочую машину и на двигатель, а в зависимости от других факторов. Так, работа вентилятора дутья или дымососа в котельной установке определяется условиями процесса горения, т. е. свойством топлива, температурой воздуха, газа и т. п.

Регулируемым двигателем или электроприводом мы называем такой, у которого мы можем менять скорость независимо от нагрузки. Эта скорость, будучи раз установлена, изменяется по тому закону, который свойственен примененному в приводе электродвигателю. Эти последние отклонения скорости от установленной мы называем изменением скорости. Изменение скорости определяется механическими характеристиками двигателей и характеризуется выраженным в процентах отношением разности чисел оборотов в минуту при холостом ходе и при нагрузке к числу оборотов идеального холостого хода (шунтовой, асинхронный двигатель). В серийных двигателях изменение скорости относят к номинальному числу оборотов в минуту.

Изменение скорости электропривода всегда происходит под влиянием изменения нагрузки производственной машины и притом почти всегда автоматически, т. е. без какого бы то ни было внешнего воздействия на двигатель посредством реле, передвижения реостатов и т. п.

Регулировка скорости происходит вообще всегда при некотором добавочном воздействии на двигатель посредством того или иного приспособления (реостата, механизма для передвижения щеток, переключателя, реле и т. п.), причем это воздействие может быть получено или от руки или от специального автомата.

Вопрос о приводе регулируемых рабочих машин в современной практике имеет чрезвычайно большое значение для решения задач электрооборудования того или другого промышленного предприятия, так как от решения этого вопроса зависит выбор рода тока как для питания отдельных двигателей, так иногда и отдельных цехов или установок.

Применение регулировки скорости иногда меняет сам производственный процесс, упрощает рабочие машины. Так, мы имеем возможность из многих металлорежущих станков удалить ряд промежуточных, регулирующих передач, перенося регулировку на электродвигатель.

Регулирование скорости характеризуется пределами (или степенью) регулирования. Пределами регулирования называется отношение максимального числа оборотов в минуту при номинальном токе к минимальному числу оборотов в минуту при номинальном токе для случая установившегося режима. Обычно это отношение выражают в числах (1,5:1; 2:1; 4:1; 10:1; 20:1). Различные механизмы даже одного и того же наименования могут требовать различных пределов регулирования. Так, один металлорежущий станок может требовать регулирования в пределах 4:1, другой — 10:1. Бумагоделательная машина, изготавливающая газетную бумагу, требует регулирования в пределах 3:1. Бумагоделательная машина, которая предназначается для производства бумаги, идущей на изготовление государственных гербовых бумаг или фотобумаги, часто требует регулирования в пределах 20:1. Реверсивные и нереверсивные прокатные станы могут требовать регулирования от 2:1 до 5:1 и выше.

Говоря о регулировании скорости необходимо определить понятие ступени скорости. Под ступенью регулирования скорости понимается каждое число оборотов в минуту при номинальном токе и установившемся режиме, соответствующем определенному положению регулировочного реостата или специального реостата-регулятора. Число ступеней скорости равно числу предусмотренных оборотов в минуту на реостате или регуляторе. В отдельных случаях (бумагоделательные машины) число ступеней регулировки по условиям, требуемым производством, может достигать нескольких сотен. Число ступеней электрического регулирования скорости мы в дальнейшем будем обозначать буквой δ .

88. Особенности выбора мощности двигателей для исполнительных механизмов с регулируемой скоростью

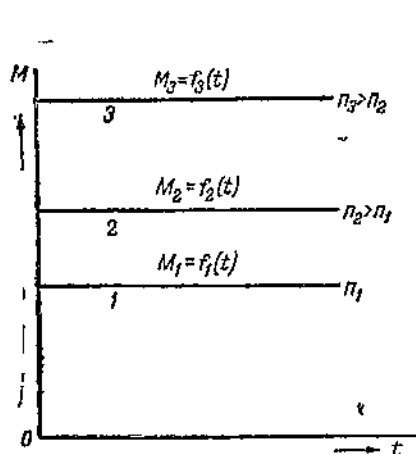
• В том случае, когда речь идет о нерегулируемом электроприводе, определение мощности двигателя производится по одной нагрузочной диаграмме — по методу эквивалентного тока (момента, мощности). Если же рассматривается регулируемая рабочая машина, то необходимо произвести определение мощности двигателя для различных скоростей, т. е. разных ступеней регулировки.

Положим, что некоторые исполнительные механизмы работают в отдельные периоды с регулировкой скорости от 500 до 1 000 об/мин. Для выбора мощности двигателя необходимо рассмотреть работу машины на разных ступенях скорости. Понятно, что нет нужды строить нагрузочные диаграммы привода для всех без исключения ступеней скорости, но во всяком случае эти диаграммы должны быть построены для наиболее характерных ступеней или через известные интервалы скорости, или для каких-либо специальных условий работы машины при определенных скоростях

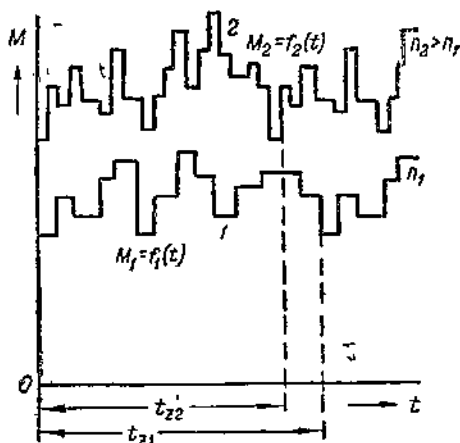
В зависимости от типа регулируемого производственного механизма эти диаграммы могут быть или прямыми, параллельными оси абсцисс, или представлять разные иррегулярные кривые.

Так, на фиг. 239 представлены нагрузочные диаграммы для центробежного вентилятора при трех разных скоростях, а на фиг. 240 — для непрерывного регулируемого стана при двух скоростях.

В последнем случае ввиду цикличности работы графики даны для одного цикла. В приведенных рисунках нагрузочные диаграммы



Фиг. 239. Нагрузочные диаграммы центробежного вентилятора при трех разных скоростях.



Фиг. 240. Нагрузочные диаграммы некоторого непрерывного регулируемого прокатного стана при двух различных скоростях.

мы при более высоких скоростях имеют большие ординаты — большие значения моментов. Но на практике в зависимости от типа и режима работы механизма может иметь место и обратный случай — при больших скоростях нагрузочные диаграммы момента $M=f(t)$ могут идти и ниже.

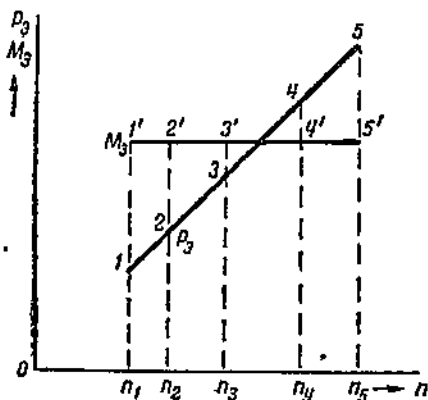
Поскольку каждой ступени скорости механизма соответствует своя нагрузочная диаграмма, то, очевидно, что и каждой ступени соответствует своя эквивалентная мощность двигателя. Стало быть, номинальная мощность двигателя, которая требуется от него данной производственной машиной на разных ступенях скорости, в общем случае может быть не одна и та же. Положим, для одной скорости механизма может быть достаточна мощность 40 kW, для другой — необходимо 80 kW.

Определив для каждой нагрузочной диаграммы эквивалентный момент и мощность, мы можем графически выразить требуемый от двигателя характер изменения этих величин в зависимости от ступеней скорости. Такие кривые по точкам нескольких эквивалентных моментов $M_{э1}, M_{э2}, M_{э3}, \dots, M_{эn}$ (или эквивалентных

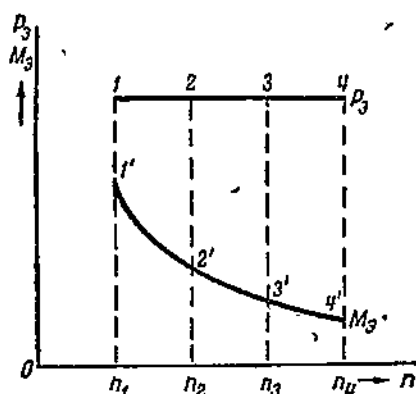
мощностей) в функции от числа оборотов в минуту для соответствующей ступени, для нескольких частных случаев нанесены на фиг. 241, 242, 243. Таким образом получающийся характер изменения M_e или P_e при разных скоростях мало или почти не зависит от свойств двигателя и определяется прежде всего свойствами производственной машины.

89. Различный характер изменения момента и мощности исполнительных механизмов при регулировке скорости и соответствующие свойства для эквивалентных величин некоторых типов электродвигателей

Характер изменения эквивалентного (в отношении нагрева) момента двигателя в зависимости от пределов регулирования скорости, требуемых исполнительным механизмом, может быть различен.



Фиг. 241. Изменение M_e и P_e в случае регулировки при постоянном моменте.



Фиг. 242. Изменение M_e и P_e в случае регулировки при постоянной мощности.

На фиг. 241—243 представлены наиболее типичные случаи, хотя в общем возможен любой характер изменения M_m по закону

$$M_m = M_0 + (M_N - M_0) \cdot \left(\frac{n}{n_N}\right)^{\alpha-1}. \quad (257)$$

Фиг. 241 соответствует закону постоянства эквивалентного момента при разных скоростях. Этот случай мы называем регулировкой при постоянном моменте. Так как $P_e = M_e \omega_n$, то эквивалентная мощность P_e в данном случае прямо пропорциональна скорости.

При заказе электродвигателя для подобного регулируемого исполнительного механизма мы не имеем права сказать, что нам нужен двигатель на 1 000 kW, 500/1 000 об/мин. При заказе необходимо написать, что нам требуется двигатель 1 000/2 000 kW, 500/1 000 об/мин.

Если (фиг. 242) длительный вращающий момент двигателя M_0 изменяется в зависимости от скорости по гиперболе, то эквивалентная мощность двигателя P_0 остается постоянной, т. е. от двигателя требуется одна и та же мощность на всем интервале регулировки скорости. Для подобной рабочей машины мы должны заказать двигатель одной и той же мощности при всех скоростях, т. е. 1 000/1 000 kW, 500/1 000 об/мин, иначе говоря, просто 1 000 kW, 500/1 000 об/мин. Подобный случай носит название регулировки при постоянной мощности.

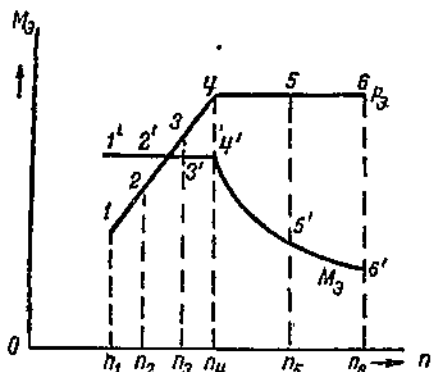
Фиг. 243 соответствует комбинированной регулировке от n_1 до n_4 при $M_0 = \text{const}$, от n_4 до n_6 — $P_0 = \text{const}$. Далее в механизмах вентиляторного типа возможна, например, регулировка при квадратичном изменении момента, т. е. при кубическом изменении эквивалентной мощности от скорости. Для подобного случая необходимо было бы заказать двигатель, положим, на 50/400/1 350 kW, 500/1 000/1 500 об/мин. Такие условия регулировки мы называем регулировкой при квадратичном моменте.

Как уже отмечено выше, характер изменения требуемого при регулировке от двигателя эквивалентного момента (или мощности) зависит всецело от свойств производственной машины. Двигатель должен развивать такую нагрузку, которая требуется этой машиной.

Пример регулировки при постоянном моменте представляют некоторые прокатные станы, конвейеры, каландры, накатные аппараты и т. д.

Регулировка при постоянной мощности имеет, например, место в металлорежущих станках с неизменным направлением вращения и некоторых прокатных станах. Регулировка при квадратичном моменте характеризует некоторые центробежные механизмы: вентиляторы, насосы, гребной винт.

Так, металлорежущий станок с неизменным направлением вращения требует при регулировке скорости постоянной мощности по следующим соображениям. Механическая конструкция станка изготавливается таким образом, что она может надежно выдерживать работу при определенной мощности. Рациональное использование оборудования требует работы на станке при полной мощности при всех условиях. Это допускают и законы резания металлов. Чем меньше сечение снимаемой стружки, тем больше может быть скорость вращения станка. С предметов малого диаметра могут сниматься стружки меньшего сечения, но они могут сни-



Фиг. 243. Изменение P_0 и M_0 в случае комбинированной регулировки.

маться при высокой скорости. При больших диаметрах предметов, идущих с меньшей скоростью, может сниматься большее сечение стружки. Скорость резания при этом остается примерно постоянной. Точно так же будет постоянной и мощность станка, определяемая произведением сопротивления металла резанию, примерно пропорционального сечению стружки, и скоростью станка. Очевидно, что от двигателя, устанавливаемого на таком станке, требуется постоянная мощность на всех ступенях регулировки скорости.

Таким образом закон изменения эквивалентного момента регулируемого двигателя определяется всецело характером производственного процесса и свойствами исполнительного механизма.

Выбираемый двигатель должен полностью удовлетворить требованиям, которые ему ставятся.

Принципиально всякий тип электродвигателя или электродвигательной установки (каскады) при соответствующем выборе мощности может (с чрезмерным запасом для отдельных ступеней регулирования) удовлетворить любому закону изменения момента при регулировке скорости, не перегреваясь. Однако всякий определенный тип двигателя более всего подходит лишь к некоторым определенным законам изменения момента исполнительного механизма от скорости.

Для большей ясности рассмотрим несколько примеров. Возьмем шунтовой двигатель постоянного тока с регулировкой скорости током возбуждения. Мощность этого типа двигателя, как всякого электродвигателя,

$$P_s = M_s \cdot \omega.$$

Допустимый для двигателя эквивалентный вращающий момент M_s пропорционален току и магнитному потоку $M_s = c \cdot I_s \cdot \Phi$.

Выясним, как в шунтовом двигателе будет изменяться эквивалентный момент, т. е. тот момент, который двигатель может надежно и притом длительно развивать при разных скоростях при наибольшем допустимом нагреве, т. е. без повреждения изоляции. Очевидно, что на всем интервале регулировки скорости эквивалентная сила тока I_s может оставаться постоянной. Влиянием изменения вентиляции при разных скоростях мы для упрощения пренебрегаем. Работает ли наш двигатель, положим, при 500 об/мин или при 1000 об/мин $I_s = \text{const}$. Следовательно, эквивалентный момент двигателя будет зависеть только от магнитного потока $M_s = c' \cdot \Phi$.

Но при регулировке скорости двигателя током возбуждения число оборотов в минуту обратно пропорционально потоку

$$n = \frac{U - I_s R}{c'' \Phi} = \frac{c_1}{\Phi}.$$

$$\text{Стало быть, } M_s = c' \Phi = c' \cdot c_1 \frac{1}{n} = c'' \cdot \frac{1}{\omega},$$

$$\text{откуда } P_s = c \cdot I_s \Phi \cdot \omega = c_2 \cdot I_s \frac{1}{\omega} \cdot \omega = c_2 I_s = \text{const}.$$

Таким образом эквивалентная мощность шунтового двигателя при регулировке его скорости током возбуждения остается постоянной во всем интервале регулировки. Эквивалентный же момент падает по закону гиперболы (фиг. 244). Стало быть, шунтовой двигатель постоянного тока с регулировкой скорости током возбуждения вполне подходит для металлорежущего станка, но мало экономичен для вентилятора. Характер изменения момента шунтового двигателя при изменении скорости обратен характеру изменения момента вентилятора (см. ниже фиг. 245).

Положим, что вентилятор требует мощности 20/160/540 kW, 500/1 000/1 500 об/мин. Мы должны взять шунтовой двигатель на мощность в 540 kW, 500/1 500 об/мин. Очевидно, что при всех скоростях, меньших 1 500 об/мин, он будет работать недогруженным.

Возьмем шунтовой коллекторный двигатель переменного тока типа Рихтера-Шраге. В этом двигателе при регулировке скорости сдвигом щеток и при постоянном приложенном напряжении магнитный поток остается постоянным. Эквивалентная сила тока также неизменна $I_s = \text{const}$.

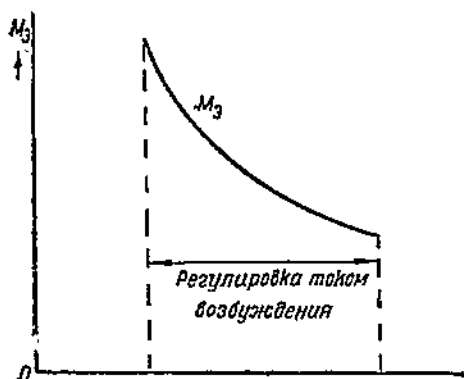
Следовательно,

$$M_s = c \cdot I_s \cdot \Phi = \text{const},$$

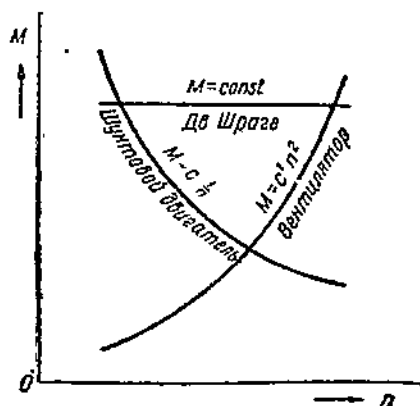
эквивалентная мощность

$$P_s = M_s \cdot \omega = c' \cdot \omega,$$

т. е. изменяется пропорционально скорости вращения. Следовательно, двигатель Рихтера-Шраге является регулируемым двигателем постоянного момента. В рассматриваемом примере вентилятора мы должны были бы взять двигатель Рихтера-Шраге на мощность в 540/360/180 kW, 1 500/1 000/500 об/мин. При всех скоростях, меньших 1 500 об/мин., двигатель Шраге точно так же был бы недогружен



Фиг. 244. Изменение эквивалентного момента шунтового двигателя при регулировании его скорости током возбуждения.



Фиг. 245. Сравнение характера изменения моментов шунтового двигателя, двигателя Шраге и центробежного вентилятора.

На фиг. 245 представлено изменение эквивалентных моментов: а) шунтового двигателя постоянного тока при регулировке током возбуждения; б) двигателя Шраге; в) центробежного вентилятора.

Очевидно, что двигатель Шраге к режиму регулируемого вентилятора подходит ближе, чем шунтовой двигатель постоянного тока. Однако оба типа двигателей по своим свойствам оказываются все-таки не вполне подходящими для вентилятора.

Наиболее близко к центробежному вентилятору принципиально подошел бы многоскоростной асинхронный двигатель с несколькими отдельными обмотками на статоре при разном числе полюсов каждой. Обмотки больших чисел полюсов должны быть взяты меньшего сечения на меньшую силу тока. При этом каждая соответствующая обмотка низкой скорости должна давать меньший момент, т. е. меньшую мощность. Однако такой двигатель, пригодный лишь для ступенчатой регулировки, будет достаточно дорогим. Практически в таких случаях мы находим применение и асинхронного двигателя с кольцами с регулировкой сопротивлением в роторе и шунтового двигателя постоянного тока и двигателя Шраге.

90. Способы регулирования скорости двигателей постоянного тока.

Применяемые в промышленности способы регулирования скорости двигателей постоянного тока могут быть разделены на следующие:

1. Регулирование скорости двигателя изменением тока возбуждения (преимущественно для шунтовых и компаундных двигателей).

2. Регулирование сопротивлением в цепи якоря.

3. Последовательно-параллельное включение двигателей.

4. Трех- и пятипроводные системы.

5. Система Леонарда, в частности с амплидином, рототролем, регулексом.

6. Система согласного и встречного включения.

7. Регулирование скорости двигателей при питании их от ртутных выпрямителей или тиратронов регулированием напряжения на сетке последних.

91. Регулирование скорости шунтовых двигателей изменением тока возбуждения

Способ регулирования скорости изменением тока возбуждения является одним из наиболее экономичных способов регулирования шунтового двигателя. Получаемые при этом механические характеристики были рассмотрены ранее в п. 32.

Выше в п. 89 было показано, что эквивалентный момент шунтового двигателя в этом случае изменяется по закону гиперболы, эквивалентная мощность остается постоянной, т. е. регулируемый

током возбуждения шунтовой, двигатель является двигателем постоянной мощности.

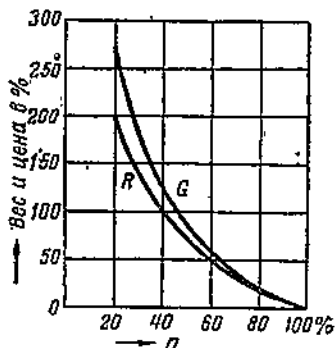
То число оборотов в минуту, которое двигатель имеет при номинальной нагрузке и при полном магнитном потоке, при номинальном напряжении на зажимах, называется основным или номинальным числом оборотов двигателя. Все более высокие скорости получаются уменьшением тока возбуждения. Таким образом основное число оборотов соответствует наименьшему числу оборотов в желаемых пределах регулировки.

Поскольку максимальный возможный для двигателя момент продолжительной работы определяется полным потоком и номинальным током, то очевидно, что габариты, вес и стоимость регулируемого двигателя определяются прежде всего основным числом оборотов в минуту. Регулируемый двигатель на 500/1 000 об/мин и некоторый нерегулируемый двигатель той же мощности имеют одни и те же размеры, при 500 об/мин. Поэтому для уменьшения стоимости самого двигателя нужно стремиться брать основное число оборотов в минуту по возможности выше.

Влияние выбора основного числа оборотов в минуту на стоимость и вес шунтового двигателя одной и той же мощности видны из кривых фиг. 246.

Характер приведенных на фиг. 246 кривых относится лишь к двигателю некоторой определенной мощности с определенным номинальным числом оборотов в минуту. Поэтому данные кривые можно считать лишь ориентировочными, но далеко не всеобщими. Чем выше основное число оборотов в минуту и чем ниже мощность, тем более полого идет эта кривая. Таким образом разность стоимости между двигателем высокой и низкой скорости при малых мощностях будет меньше, а при больших — выше. Кроме того при очень высоких скоростях на сцену выступает повышение стоимости двигателя за счет усиления механической конструкции. При очень низких скоростях играет роль ухудшение охлаждения.

Допустимое при регулировке током возбуждения повышение скорости двигателя зависит от ряда факторов. При сильном уменьшении тока возбуждения машина, становясь малонасыщенной, начинает работать мало устойчиво, в особенности при резко меняющихся нагрузках. Далее, при значительном повышении скорости вообще ухудшаются условия коммутации двигателя.



Фиг. 246. Повышение стоимости и веса шунтового двигателя постоянной тока некоторой мощности при понижении основного числа оборотов в минуту.

Реактивная э. д. с. — основная причина электромагнитного характера, могущая вызывать искрение в машинах постоянного тока.

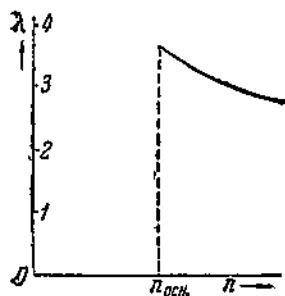
$$e_r = c \cdot I \cdot n.$$

Поскольку при повышении скорости I_a остается постоянным, а n растет, то с расширением пределов регулировки возрастает и реактивная э. д. с. Эта причина также влияет на установление пределов регулировки.

Кроме того повышение максимальной скорости часто обуславливает необходимость усилить механическую конструкцию якоря.

Нормальные регулируемые шунтовые двигатели постоянного тока конструируются с пределом регулирования скорости, т. е. с отношением максимального числа оборотов к основному, равным 1,5 : 1; 2 : 1; 2,5 : 1; 3 : 1 и 4 : 1. Предельными достижимыми технически цифрами следует считать отношение 5 : 1, хотя двигатель с регулированием выше 3 : 1 является вообще уже мало экономичным.

Особо необходимо отметить вопрос о перегрузочной способности регулируемых двигателей постоянного тока в случае работы двигателей на резко пиковых приводах (реверсивные прокатные станы, артиллерийские установки). Нормальные шунтовые двигатели имеют перегрузку при основной скорости, т. е. при полном потоке. $\lambda_0 = 2$, специальные 3—4. Однако при регулировке скорости током возбуждения указанные величины на высших скоростях выдержать без значительного удорожания двигателя не удастся. Поскольку реактивная



Фиг. 247. Изменение перегрузки λ_n регулируемого шунтового двигателя в зависимости от скорости.

э. д. с., обуславливающая искрение на коллекторе, пропорциональна току и скорости, то при высокой скорости, положим $n_{оск}$, ее значение может достигнуть такой величины, что машина начнет искрить. В таком случае допустимую перегрузку двигателя при высших скоростях, т. е. при ослабленном поле, приходится снижать, ограничивая ее меньшими цифрами при $\lambda_0 = 4$ до 2,3 и при $\lambda_0 = 2$ до 1,5. При этом при проверке двигателя на перегрузку по нагрузочным диаграммам, соответствующим разным ступеням скорости, приходится брать разные цифры. Для примера на фиг. 247 представлено изменение λ в зависимости от скорости; в некотором регулируемом двигателе для реверсивного прокатного стана. Проверку двигателя на перегрузку нужно делать не для одной точки максимального момента нагрузочной диаграммы, как в нерегулируемых двигателях, а для всех максимальных моментов каждой ступени скорости. Практически можно ограничиться проверкой в 6—10 точках.

92. Регулирование скорости сопротивлением в цепи якоря двигателя постоянного тока и комбинированная регулировка в шунте и в якоре для шунтовых двигателей

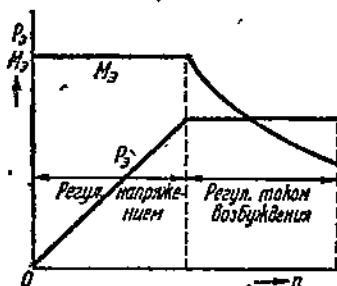
Этот способ регулирования скорости по существу был с достаточной глубиной рассмотрен в отделе механических характеристик применительно ко всем типам двигателей постоянного тока. Здесь напомним лишь, что введение сопротивления в цепь якоря сильно компаундирует двигатель, т. е. меняет характер изменения скорости. В то время как в шунтовом двигателе без сопротивления в цепи якоря скорость с увеличением нагрузки меняется мало, при добавочном сопротивлении получается значительное падение скорости. В силу больших потерь, полученных в добавочных сопротивлениях при регулировке скорости, этот способ регулирования является вообще неэкономичным. В двигателях длительного режима работы он применяется вообще очень редко, преимущественно в тех случаях, когда требуется кратковременное получение некоторой малой скорости, например, заправочной—в каландрах, ситцепечатных машинах и т. п. В электроприводах повторно-кратковременного режима работы (краны, вспомогательные механизмы металлургических заводов), где чаще оказывается целесообразным применение серийных и компаундных двигателей, применение этого способа регулирования оказывается обычным. При этом „пускные“ сопротивления рассчитываются на регулировочный режим.

Следует отметить, что при регулировке скорости сопротивлением в цепи якоря эквивалентный момент, развиваемый двигателем при разных скоростях, остается постоянным, так как допустимая по нагреву сила тока I_a на всем пределе регулировки скорости постоянна. Неизменно и значение магнитного потока Φ . Следовательно, двигателем с регулировкой скорости сопротивлением в якоре является двигатель постоянного момента.

Из изложенного видно, что применение того или другого способа регулировки электродвигателя вообще влияет на закон изменения эквивалентной мощности при регулировке. В то время как шунтовой двигатель постоянного тока с регулировкой скорости током возбуждения является двигателем постоянной мощности на всем пределе регулировки, этот же двигатель при регулировке скорости сопротивлением в цепи якоря оказывается двигателем постоянного момента.

Отдельные рабочие машины (например, ситцепечатные машины, типографские машины, каландры) требуют часто регулировки скорости в пределах 10:1. Нижняя скорость бывает нужна на весьма ограниченное время для заправки материи или бумаги. Шунтовой двигатель с регулировкой скорости током возбуждения в таких пределах экономичным выполнен быть не может. Неприемлемой для таких пределов является и регулировка изменением сопротивления в цепи якоря. В подобных условиях, главным об-

разом в старых установках, применяется комбинированная регулировка от максимальной скорости до основной током возбуждения и ниже основной скорости сопротивлением в цепи якоря. Током возбуждения рационально повышать скорость, положим, в 2,5 раза от n_N до $n_{\max} = 2,5n_N$. Изменение же скорости от $0,41n_{\max} = \frac{n_{\max}}{2,5}$ до $0,1n_{\max}$ может быть получено сопротивлением. По-



Фиг. 248. Изменение M_{ε} и P_{ε} при комбинированной регулировке сопротивлением в цепи якоря и током возбуждения.

скольку такая комбинированная регулировка связана с большими потерями, то экономически она целесообразна лишь там, где работа на интервале регулировки сопротивлением в якоря (в рассматриваемом примере от $0,41n_{\max}$ до $0,1n_{\max}$) происходит сравнительно редко, например, при заправке бумаги, ленты, металла, материи. Основная же регулировка чисто рабочих режимов ведется на ступенях скорости, лежащих от $n_{осн}$ до n_{\max} . В пределах регулировки напряжением за счет сопротивления в цепи якоря M_{ε} остается постоянным, P_{ε} растет по закону прямой. Далее, при регулировке током возбуждения M_{ε} изменяется по гиперболе, а P_{ε} остается постоянным (фиг. 248).

93. Последовательно-параллельное включение двигателей в сеть

Метод регулирования скорости включением сопротивлений в цепь якоря по существу представляет метод регулирования подведенного к двигателю напряжения, ибо

$$n = \frac{E}{c \cdot \Phi} = \frac{U - I_a(R_a + R_d)}{c \cdot \Phi}$$

Однако при регулировке скорости сопротивлением в якоря напряжение в реостате ($I_a R_d$) теряется бесполезно.

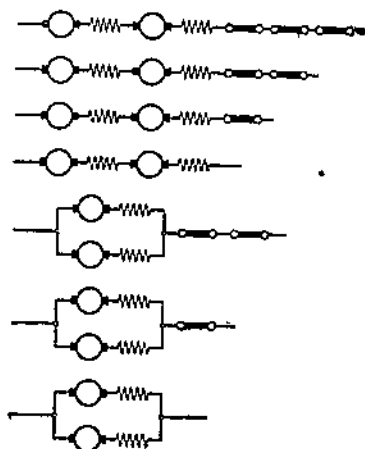
В отдельных случаях оказывается целесообразным приводить механизм двумя двигателями. Применение привода одного механизма двумя механически связанными двигателями может быть вызвано разными причинами: 1) ограниченностью мощностей закрытых невентилируемых двигателей постоянного тока—в наших условиях мощностью в 180 kW, при $\zeta = 25\%$; 2) большей надежностью работы в некоторых случаях из-за возможности вести работу при пониженной мощности на одном двигателе; 3) некоторым ускорением операций при двух двигателях вследствие меньшего

их суммарного махового момента по сравнению с одним двигателем общей мощности; 4) ббльшим удобством размещения на механизме двух двигателей меньших габаритов по сравнению с одним. Чаще всего это относится к случаям применения серийных двигателей. В качестве примеров подобного типа привода можно указать мощные разливочные и миксерные краны, мощные ножницы, доменный подъемник, трамвай и т. д. Краткий анализ особенностей работы двух или нескольких механически связанных двигателей будет дан нами дальше в гл. VIII [см. также Л. 152—154]. Здесь же мы коснемся лишь особенностей их совместного включения. При таком оборудовании наряду с введением сопротивления в цепь якоря представляется выгодным использовать последовательно-параллельное включение двигателей (фиг. 249). Очевидно, что, включая двигатели вместо параллельного соединения на последовательное, мы снижаем напряжение, приложенное к якорю отдельного двигателя, в два раза и, следовательно, уменьшаем в той же степени и скорость двигателя. Роль сопротивления, поглощающего напряжение, играет при этом второй двигатель, в котором энергия используется полезно. Этот способ регулировки дает нам возможность получить две ступени скорости без всяких бесполезных потерь. В ряде транспортных приспособлений это включение имеет существенное значение.

Подобное включение для регулировки скорости при шунтовом и компаундном типе двигателей используется несколько реже. Комбинирование последовательно-параллельного включения шунтовых и компаундных двигателей с добавочной регулировкой скорости путем уменьшения поля с отношением $1:2$ дает возможность получать пределы регулировки $1:2 \cdot 2 = 1:4$.

Очевидно, что подобный способ регулирования возможно применять лишь в тех случаях, когда один производственный механизм приводится одновременно двумя двигателями или когда два идентичных механизма или части одного должны регулироваться совершенно одинаково.

Так как подобные условия встречаются не так часто, то иногда применяют этот способ регулировки в ином осуществлении, а именно—берут один двигатель с двумя коллекторами и двумя обмотками якоря, включая их последовательно или параллельно.



Фиг. 249. Принципиальная схема переключения при последовательно-параллельном включении серийных двигателей.

94. Регулирование скорости двигателей постоянного тока при многопроводной системе

Необходимость получить широкую и плавную регулировку скорости двигателей постоянного тока в пределах 10:1 без добавочных потерь в реостатах и главной цепи и без излишних капитальных затрат на эти реостаты побудила в свое время создать так называемую пятипроводную систему постоянного тока, представляющую дальнейшее развитие трехпроводной. Трехпроводная система с равными напряжениями обоих плеч, как известно, может быть получена разными способами:

а) делением напряжения пополам посредством аккумуляторной батареи;

б) делителем напряжения (пополам) Доливо-Добровольского;

в) специальным уравнительным агрегатом, состоящим из двух машин на половинное напряжение сети. В современной практике многопроводные системы [Л. 1] значения не имеют.

95. Регулирование скорости двигателей постоянного тока по системе Леонарда

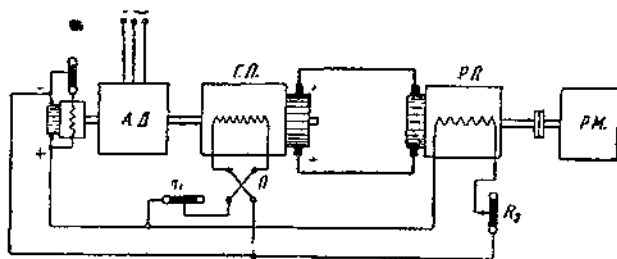
Необходимость получить широкую регулировку скорости исполнительных механизмов в пределах 10:1 и выше и иметь возможность часто пускать и реверсировать двигатель без потерь в пусковых реостатах (иногда до 12—16 раз в минуту) побудили создать такую систему, которая дает возможность совершенно плавно и широко регулировать скорость двигателя постоянного тока с небольшими потерями. Такая система была предложена Леонардом и носит его имя.

Особенность этой системы заключается в том, что генератор постоянного тока питает всего один двигатель постоянного тока и несколько лишь в том случае, если условия работы этих двигателей совершенно идентичны или вполне аналогичны, т. е. когда двигатели приводят или работающие в идентичных условиях производственные машины или когда двигатели вращают отдельные части одного и того же исполнительного механизма.

В этой системе зажимы генератора соединяются с зажимами двигателя постоянного тока непосредственно без всяких пусковых или регулировочных реостатов. Обмотки возбуждения генератора и двигателя получают ток от особого (одного или нескольких) возбuditелей (фиг. 250).

В современной практике генератор Леонарда вращается обычно двигателем переменного тока синхронного или асинхронного типа в зависимости от мощности установки (при больших и средних мощностях — синхронный, при малых — асинхронный) и от условий работы двигателя постоянного тока (при резко пиковых нагрузках последнего и очень большой мощности — асинхронный).

Генератор с вращающим его двигателем мы будем далее называть группой Леонарда. В проектной практике СССР двигатель группы называют часто „гонным“ двигателем, а питаемый генератором Леонарда двигатель „приводным“. Последнее вряд ли правильно.



Фиг. 250. Система Леонарда.

Система Леонарда прежде всего дает возможность производить пуск одного (а в ряде случаев и нескольких) двигателей постоянного тока без пускового реостата путем изменения подведенного к двигателю от генератора напряжения. Число оборотов в минуту двигателя постоянного тока

$$n = \frac{U - IR}{c\Phi}$$

Соответственно сила тока двигателя

$$I = \frac{U - E}{R}$$

В обычных условиях пуска двигателя постоянного тока приложенное к якорной цепи двигателя напряжение неизменно и равно номинальному. Обратная э. д. с. в начале пуска равна нулю, и во избежание большого тока мы вынуждены в якорь двигателя вводить большое пусковое добавочное сопротивление. Поскольку в данном случае генератор питает лишь один двигатель (или несколько, работающих аналогично), мы можем сделать напряжение этого генератора как угодно малым, уменьшая его ток возбуждения, подаваемый от особого возбуждателя.

Необходимость в пусковом реостате отпадает.

Таким образом для пускового режима система Леонарда дает три преимущества: 1) отпадает необходимость в пусковом реостате; 2) отпадают потери энергии в пусковых сопротивлениях; 3) упрощается управление из-за значительного уменьшения величины реостата и переноса управления в цепь возбуждения генератора. Однако стоимость электрооборудования по сравнению с одним двигателем, конечно, повышается, так как вместо питания двигателя от общей сети постоянного тока приходится устанавливать специальный преобразовательный агрегат для одного дви-

двигателя. Тем не менее при большом числе пусков в час выигрыш в стоимости пускового сопротивления и пусковой аппаратуры и в экономии энергии оказывается существенным. Принципиально двигатель постоянного тока в системе Леонарда может быть с независимым возбуждением, серийный и компаундный. На практике чаще применяется первый и третий типы, их мы и будем иметь в виду в дальнейшем. В целях получения при пуске от двигателя наибольшего пускового момента сила тока его возбуждения во время пуска остается постоянной и равной нормальной.

Выигрыш в потерях при пуске двигателя по системе Леонарда по сравнению с пуском посредством пускового реостата можно грубо иллюстрировать фиг. 251, относящимся к случаю постоянного статического момента.

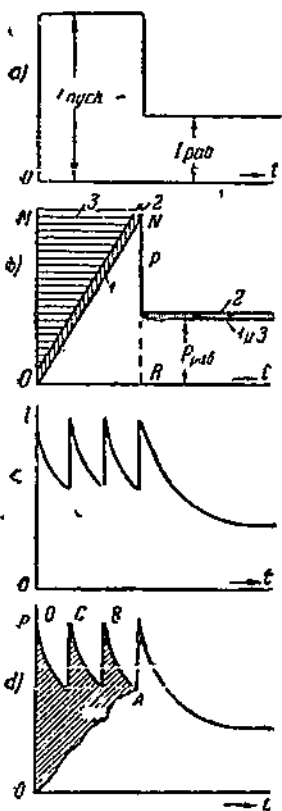
Для упрощения примем, что сила тока двигателя при пуске по системе Леонарда остается постоянной благодаря соответствующему непрерывному регулированию сопротивления в цепи возбуждения генератора. При этом сила тока двигателя будет изменяться согласно фиг. 251а.

Кривая мощности, потребляемой при этом двигателем, изображена кривой 1 фиг. 251б. Кривая 2 представляет мощность, потребленную из сети агрегатом Леонарда, т. е. кривую 1 с учетом потерь в группе Леонарда.

Если бы при пуске двигателя от сети через реостат сопротивление пускового реостата также регулировалось непрерывно и притом так, чтобы сила тока оставалась неизменной, то потребленная из сети во время пуска мощность тоже оставалась бы постоянной соответственно кривой 3 фиг. 251б. Заштрихованная площадь $OMNO$ представляет потери в

Фиг. 251. Выигрыши в потерях при пуске по системе Леонарда.

пусковом реостате. Так как на самом деле сила тока меняется ступенями по кривым фиг. 251с, то потребленная мощность при пуске через реостат будет в действительности изменяться по кривой фиг. 251д. Избыток потерь в реостате в этом случае равен площади $ODCBAO$ фиг. 251д. Таким образом потери в реостате или выигрыш при системе Леонарда (площадь $OMNO$ фиг. 251б) примерно равны работе двигателя за время пуска (площадь $ONRO$).



Одна возможность плавного и безреостатного пуска двигателей постоянного пуска является с экономической точки зрения еще недостаточным фактором для предпочтения системы Леонарда. Ее широкое распространение определяется вторым существенным обстоятельством — возможностью просто регулировать скорость двигателя в очень широких пределах изменением напряжения генератора. Если к регулированию скорости двигателя изменением напряжения генератора добавить регулирование скорости током возбуждения последнего, то наибольшие достижимые пределы регулирования по системе Леонарда следует считать от 10:1 до 20:1.

Расширение пределов регулирования скорости по системе Леонарда изменением напряжения генератора за цифры 10:1 оказывается обычно невозможным из-за недостаточно устойчивой работы двигателя при малой скорости. Эта неустойчивость является результатом того, что при малых напряжениях генератора падение напряжения в щетках на коллекторе как самого генератора, так и питаемого им двигателя составляет уже большой процент от напряжения генератора. Некоторое непостоянство падения напряжения на контакте щеток и омического падения напряжения в якорных цепях в целом и может обусловить неустойчивость в работе двигателя.

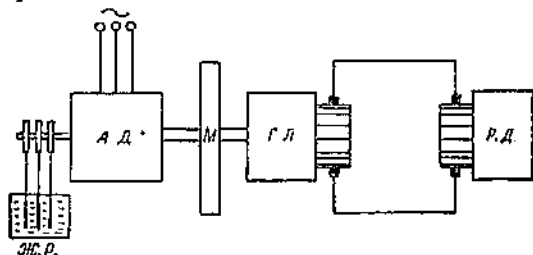
При расширении пределов регулирования системы за цифры 10:1 приходится прибегать к включению в главную цепь вольтдобавочных машин.

Заметим, что американская фирма Westinghouse с помощью применения специальных машин постоянного тока возбудителей — регуляторов Rototrol достигла в системе Леонарда регулирования в пределах 1:120, от 15 до 1800 об/мин [Л. 166].

Система Леонарда дает возможность чрезвычайно простого реверсирования двигателя постоянного тока. Меняя направление тока в обмотке возбуждения генератора, мы тем самым меняем его полярность. Изменение полярности генератора влечет за собой изменение полярности на щетках двигателя постоянного тока, иначе говоря, изменение направления тока в обмотке его якоря при неизменном направлении тока в обмотке возбуждения этого двигателя. Таким образом в отличие от обычных условий питания от сети неизменного напряжения, в которых реверсирование двигателя постоянного тока производится переключением проводов обмотки якоря или обмотки возбуждения, в системе Леонарда изменение направления вращения двигателя производится изменением направления тока в обмотке якоря посредством изменения направления тока в обмотке возбуждения генератора.

Поскольку напряжение генератора в данном случае регулируемое, то питать обмотку возбуждения как самого генератора, так и двигателя от генератора нельзя. Очевидно, что для питания обмоток возбуждения генератора и двигателя нужно устанавливать специальный возбудитель. В агрегатах небольшой мощности

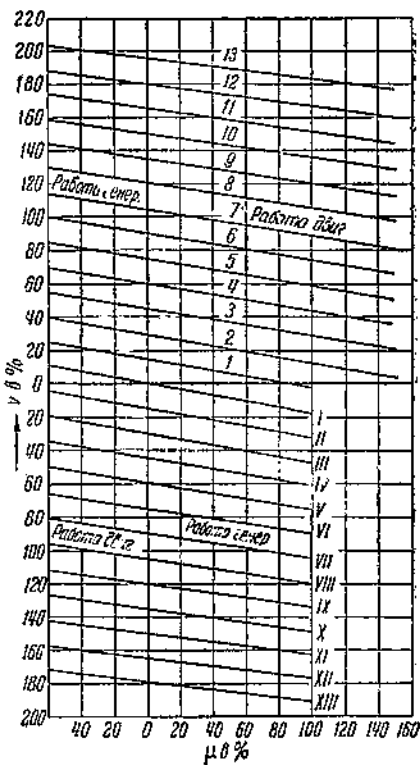
возбудитель насаживается обычно на вал группы Леонарда и приводится тем же двигателем, что и генератор Леонарда. В мощных системах обычно устанавливается отдельный возбудительный агрегат. Применение последнего становится обязательным, если вследствие резко пиковой нагрузки асинхронный двигатель, вращающий генератор, работает с маховиком и в целях лучшего ис-



Фиг. 252. Система Леонарда-Ильгнера без регулятора скольжения.

пользования последнего подвергается сильному компаундированию, как то имеет место в системе Ильгнера. Объединение системы Леонарда с системой Ильгнера в одну систему Леонарда-Ильгнера нашло применение в приводе мощных реверсивных прокатных станов (фиг. 252), в приводе мощных электрогидравлических прессов. Система Леонарда-Ильгнера установлена в СССР для питания мощных реверсивных станов на всех напих крупных металлургических заводах.

Механические характеристики электропривода по системе Леонарда (рабочие и тормозные) для одного и другого направления вращения приводного двигателя представлены на фиг. 253. Каждая из представленных характеристик в пренебрежении реакцией якоря (или при компенсированном двигателе) является обычной прямолинейной характеристикой двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при $\Phi = \text{const}$. Число таких характеристик определяется числом регулировочных ступеней в цепи возбуждения генератора. При постоянном потоке двигателя все эти характеристики будут параллельными друг другу, так как они-



Фиг. 253. Механические характеристики электропривода по системе Леонарда в случае двигателя с независимым возбуждением,

ческое падение напряжения в цепи якорей машин для всех характеристик остается одним и тем же. Идеальная скорость холостого хода n_{0x} каждой характеристики определяется напряжением генератора U_{gx} соответствующей ступени

$$n_{0x} \approx \frac{U_{gx}}{c \cdot \Phi_a},$$

В частях характеристик, лежащих при скоростях, больших скоростей идеального, холостого хода, двигатель переходит в режим генератора; в свою очередь генератор Леонарда переходит при этом в режим двигателя, помогая синхронному или асинхронному двигателю вращать группу Леонарда, а в отдельных случаях заставляя последнюю рекуперировать энергию обратно в сеть.

К характеристикам, получаемым в системе при $\Phi_a = \text{const}$ и $U_g = \text{var}$, часто добавляются характеристики при $U_g = \text{const}$ и переменном потоке возбуждения двигателя $\Phi_a = \text{var}$. Эти характеристики используются обычно для высших скоростей при расширении диапазона регулировки скорости. Они показаны в верхней части фиг. 253. Строго говоря, эти характеристики уже не будут параллельными характеристиками при $U_g = \text{const}$, так как первые должны пересекаться в одной точке на оси абсцисс (п. 32). Однако эта точка, соответствующая току короткого замыкания двигателя при $U_g = \text{const}$, лежит так далеко вправо на оси абсцисс, что практически все характеристики (в том числе и при $\Phi_a = \text{var}$) выглядят почти параллельными.

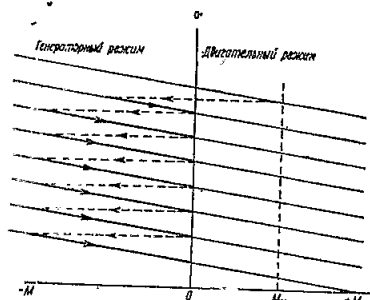
Переход от одной характеристики к другой при пуске производится постепенно перестановкой (вручную или автоматически) сначала реостата цепи возбуждения генератора (усиление его поля), а затем реостата цепи возбуждения двигателя (ослабление поля двигателя). Простота получения большого числа ступеней в цепи возбуждения генератора Леонарда обеспечивает возможность достижения исключительно плавного пуска электропривода. В этом отношении система Леонарда может считаться самой лучшей и практически не может быть превзойдена двигателями постоянного тока, питаемыми от неизменного напряжения.

Система Леонарда имеет также преимущество весьма плавного торможения с непрерывной рекуперацией энергии до самых малых скоростей. Торможение должно производиться в нем в обратном порядке по сравнению с пуском. Постепенно переключая реостаты — сначала в цепи возбуждения двигателя (его высшая скорость достигнута уменьшением его тока возбуждения), а затем в цепи возбуждения генератора, мы сначала почти мгновенно повышаем э. д. с. двигателя над э. д. с. генератора (при увеличении Φ_a и при $\Phi_g = \text{const}$), а затем уменьшаем э. д. с. генератора по сравнению с э. д. с. двигателя (при $\Phi_a = \text{const}$ и при постепенном уменьшении Φ_g). Тем самым мы переводим двигатель в генераторный режим. При этом работа двигателя при торможении про-

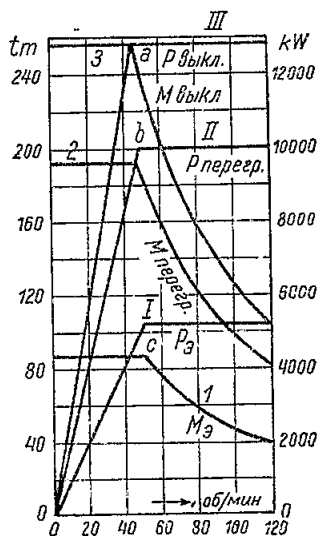
исходит по механическим характеристикам так, как показано на фиг. 254.

Торможение здесь может быть сделано как угодно плавным и притом без всяких излишних потерь энергии в главной цепи. Опять-таки там, где требуется весьма плавная остановка исполнительного механизма или регулировка режима остановки, система Леонарда является почти непревзойденной.

Характеристики системы Леонарда в отношении изменения эквивалентных мощностей и моментов при разных скоростях могут быть представлены следующим образом. До основного числа оборотов двигателя в минуту изменение его скорости ведется изменением напряжения генератора U_g , магнитный поток двигателя Φ_d при этом остается постоянным. Следовательно, на всем этом диапазоне будет оставаться постоянным и эквивалентный момент M_e . Эквива-



Фиг. 254. Торможение в системе Леонарда.



Фиг. 255. Характеристики реверсивного прокатного двигателя, питаемого по системе Леонарда.

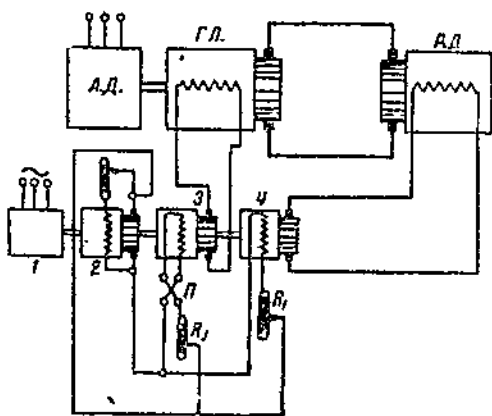
лентная мощность двигателя при этом будет меняться по закону прямой линии, как и при регулировке напряжения на зажимах двигателя при помощи сопротивления в цепи якоря. После перехода за основное число оборотов в минуту напряжение генератора $U_g = \text{const}$, а регулировка ведется током возбуждения двигателя. Очевидно, что для этого диапазона эквивалентный момент изменяется по закону гиперболы, эквивалентная мощность остается постоянной. На фиг. 255 представлены характеристики момента M (в тонно-метрах) и мощности P в kW для реверсивного прокатного двигателя номинальной мощностью в 5200 kW, питаемого по системе Леонарда. Кривые даны для эквивалентных перегрузочных и выключающих величин.

Кривые I и I' дают соответственно изменения M_e и P_e . Точка C является разделом между регулировкой напряжением генерато-

ра и регулировкой током возбуждения двигателя и соответствует основному числу оборотов 50 в минуту. Кривые *З* и *III* дают максимальный, или, как его называют, выключающий момент и выключающую мощность двигателя при разных скоростях. По этим кривым устанавливаются максимальные автоматические выключатели, отключающие генератор от двигателя. Значение λ принято равным примерно 3 от 0 до 50 об/мин. Оно равно 2,6 при 120 об/мин, снижаясь постепенно от 3 до 2,6 в этих пределах. Расчетная величина перегрузочного момента и мощности, для проверки при построении нагрузочных диаграмм (кривые *2* и *II*) берется обычно ниже выключающих величин на 25—30% для скорости от нуля до основной и на 20% ниже для максимальной скорости. В

случае фиг. 255 выключающая мощность за основным числом оборотов в минуту остается постоянной.

В том случае, когда регулируемая производственная машина, а стало быть и регулируемый реверсивный двигатель постоянного тока оказываются большой мощности (реверсивный прокатный стан), то реостаты, включаемые в цепь возбуждения генератора и в цепь возбуждения двигателя, становятся довольно громоздкими



Фиг. 256. Квадратичная система Леонарда.

и дорогими. В больших машинах сила тока возбуждения оказывается также значительной и введение реостатов в цепь возбуждения машин вызывает довольно значительные потери. При большом числе реверсирований в час или в минуту, а в реверсивных прокатных установках мощностью в 5 000—7 000—10 000 kW число реверсирований двигателей доходит до 12—20 в минуту, управление этими реостатами в цепи возбуждения генератора и двигателя для человека становится тяжелым или прсто непосильным. Поэтому в случае крупных мощностей иногда вместо ординарной системы Леонарда применяется квадратичная система Леонарда.

Ссобенность этой квадратичной системы Леонарда заключается в том, что как генератор, так и двигатель имеют свой собственный отдельный возбудитель (фиг. 256).

Возбуждающий агрегат, расположенный отдельно, в данном случае состоит из 4 машин: асинхронного двигателя небольшой мощности *1* и трех машин постоянного тока. Одна из машин возбуждающего агрегата *4* является возбудителем реверсивного двигателя *РД* и питает его обмотку возбуждения непосредственно со щеток без всяких реостатов. Машина *3* является возбудите-

лем генератора и опять-таки питает обмотку возбуждения последнего без всяких промежуточных реостатов и переключателя. Вся регулировка перенесена на цепь возбуждения возбудителей. Первый возбудитель 2, работающий с самовозбуждением, при неизменном напряжении питает обмотку возбуждения возбудителя двигателя через реостат R_1 . Таким образом регулировка тока возбуждения двигателя перенесена из цепи возбуждения двигателя в цепь возбуждения его возбудителя. Этот же первый возбудитель 2 через реостат R_2 и переключатель направления тока Π питает обмотку возбуждения возбудителя генератора. Таким образом регулировочные реостаты и переключатель для изменения направления тока перенесены из цепей возбуждения главных машин в цепь возбуждения их возбудителей, что дает удешевление как в отношении стоимости реостатов, так и уменьшения потерь в них, но, что самое главное, дает упрощение управления за счет меньших регулируемых токов.

Квадратичная система Леонарда была впервые предложена в Германии в тот период, когда там автоматическое управление было распространено сравнительно мало и упрощение ручного управления реостатами играло естественно большую роль. Значение квадратичной системы теперь усилилось в связи с широким внедрением непрерывного управления электроприводами [Л. 248]. Исключительные пусковые, регулировочные и тормозные свойства системы Леонарда вызвали ее широкое распространение в самых разных отраслях промышленности (металлургия, бумажная промышленность, внутризаводской транспорт, нефтяная промышленность, холодная обработка металлов, шахтный подъем, морской транспорт и т. д.). В последние годы в качестве возбудителей в системе Леонарда стали применяться специальные машины — амплидин [§ 128, Л. 33'] фирмы GEC, ротороль [Л. 33', 166] фирмы Westinghouse, регулекс фирмы Allis-Chalmers [Л. 238', 238"'].

Интересно отметить, что в последние годы в приводе металло-режущих станков стала применяться система Леонарда с серийным генератором и серийным двигателем. Механические характеристики подобной системы близки к компаундным характеристикам.

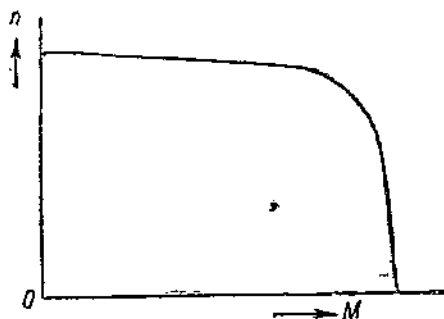
При использовании системы Леонарда для подъемно-транспортных устройств в последнее время был применен добавочный так называемый поперечный возбудитель Уастринга (El. Eng., 1944, февраль).

96. Система Леонарда с трехобмоточным генератором [Л. 155 — 156]

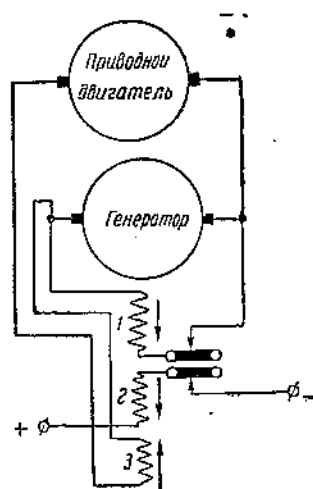
Систему Леонарда оказывается целесообразным применять к целому ряду исполнительных механизмов, в которых в силу условий их работы возможны очень большие перегрузки вплоть до

заклинивания движущихся частей. Сюда относятся прежде всего обыкновенные и башенные экскаваторы, электропривод ледоколов, вращательное бурение и связанные с ним операции в нефтяной промышленности, рудные перегружатели, маневровые толкачи на железных дорогах, манипуляторы, нажимные винты, подъемные столы, ножницы при прокатных станах. В случае применения обыкновенной системы Леонарда чрезмерное возрастание нагрузки и заклинивание подобных механизмов вызвало бы при работе двигателя на ступенях регулировки, соответствующих высоким и средним скоростям, чрезмерный ток короткого замыкания, опасный для электропривода и механизма как в механическом, так и электрическом отношении. Поскольку подобные условия работы указанных механизмов являются для них совершенно нормальными, применение для электропривода максимальной защиты совершенно не решило бы задачи, так как электропривод должен проходить через неизбежные пики нагрузки, не выключаясь. Практически в этих случаях необходимо при сохранении для электропривода основных пускорегулировочных свойств системы Леонарда ограничить мощность иметь место в ней токи короткого замыкания. Это было достигнуто специальным противокомпаундированием генератора Леонарда подобно тому, как это применялось еще ранее в машине Кремера для целей сварки. Противокомпаундирование генератора при этом должно быть выполнено так, чтобы его напряжение и, стало быть, скорость питаемого им двигателя до некоторой предельной допустимой перегрузки по возможности менялись мало, после чего резко падали бы до нуля. Такая характеристика, наиболее выгодная с точки зрения производительности механизмов и вполне целесообразная с точки зрения надежности работы и безопасности, представлена на фиг. 257.

Подобная характеристика достигается применением на генераторе Леонарда

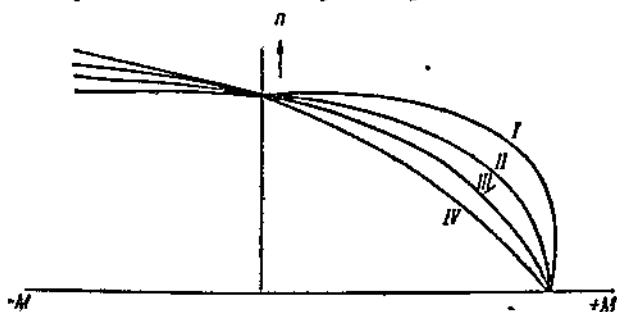


Фиг. 257. Желательная механическая характеристика двигателя при специально компаундированном генераторе Леонарда.



Фиг. 258. Система Леонарда с трехобмоточным генератором.

трех обмоток возбуждения: 1) обмотки независимого возбуждения; 2) согласно с ней действующей шунтовой обмотки; 3) встречно действующей противокомпаундной обмотки. Схема включения системы Леонарда для этого случая представлена на фиг. 258.

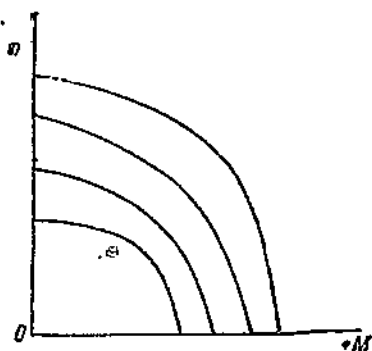


Фиг. 259. Различные варианты механических характеристик.

В зависимости от соотношения ампервитков возбуждения отдельных обмоток можно менять форму механической характеристики. На фиг. 259 даны характеристики для разных соотношений ампервитков обмоток возбуждения.

	ΔW Незав. возб. при холостом ходе	ΔW самовозб. при холо- стом ходе	ΔW противокомпаундные при нормальной нагрузке
I	20	80	10
II	40	60	30
III	60	40	50
IV	100	0	90

По изложенным выше соображениям наиболее целесообразной является характеристика I фиг. 259. Изменение ампервитков обмотки независимого возбуждения и самовозбуждения посредством регулирования в их цепях сопротивления, как и в нормальной системе Леонарда, дает возможность получить от двигателя механические характеристики вида



Фиг. 260. Механические характеристики системы Леонарда с трехмоточным генератором при разных токах возбуждения.

фиг. 260.

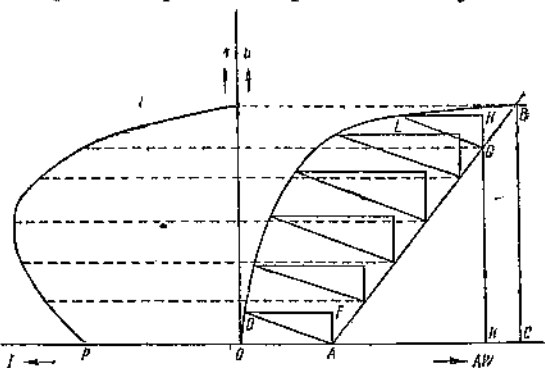
Так как при неизменном токе возбуждения двигателя его число оборотов в минуту и напряжение генератора практически пропорциональны, то для получения механической характеристики двигателя нужно построить внешнюю характеристику генератора.

Она в некотором масштабе и будет являться характеристикой двигателя. Внешнюю характеристику генератора можно построить, имея характеристику холостого хода генератора и принимая определенное соотношение ампервитков отдельных обмоток возбуждения.

Построение внешней характеристики трехобмоточного генератора, являющейся в то же время механической характеристикой двигателя, дано на фиг. 261. В любой такой внешней характеристике

$$AW_{r_{cs}} = AW_1 + AW_2 - AW_3,$$

где AW_1 — ампервитки независимого возбуждения, AW_2 — ампервитки самовозбуждения, AW_3 — ампервитки противокомпаундной обмотки. Откладывая $OA = AW_1$ и $AC = AW_2$, получаем э. д. с. холостого хода генератора BC . Изменение ампервитков самовозбуждения при нагрузке происходит по закону прямой AB , тангенс угла наклона которой к оси абсцисс будет равен сопротивлению цепи самовозбуждения. Для нахождения напряжения генератора при токе I строим реактивный треугольник HGL со стороной $HG = IR_N$ и $HL = AW_3 + AW_{r_{cs}}$.



Фиг. 261. Построение внешней характеристики трехобмоточного генератора.

Помещая реактивный треугольник между характеристикой холостого хода и линией AB так, чтобы точка L упала на характеристику холостого хода, а точка G — на прямую AB , получим напряжение генератора U_g , равное при данном токе KG . Соответствующая точка снесена на фиг. 261 влево, где показана кривая $U_g = f(I)$ или, что то же, $n_d = f(M_d)$.

Величина последовательных витков возбуждения при заданном токе короткого замыкания I_k может быть найдена следующим образом. Точка A прямой AB определяет положение $U_g = 0$. Отложим $AF = I_k R$. Построим реактивный треугольник AFD , в коем $AF = I_k R$. Сторона FD определит ампервитки серийной обмотки.

Практическое решение задачи для электроприводчиков ставится обычно следующим образом. Задано напряжение генератора при холостом ходе U_{g0} , задано $n_N = \frac{n_0}{1,2 \div 1,5}$ и задан ток короткого замыкания $I_k = (2,3 \div 2,5) I_N$ (по условиям коммутации и соображениям безопасности). Для решения задачи приходится задаваться

отношением $\psi = AW_{20} : AW_1$. Подсчеты показывают, что наиболее удобное соотношение лежит в пределах от 3 до 4,4. Обозначим $AW_1 + AW_{20} = AW_{g0}$. В таком случае

$$AW_1 = \frac{AW_{g0}}{\psi + 1},$$

$$AW_{20} = \frac{\psi \cdot AW_{g0}}{\psi + 1}.$$

При коротком замыкании

$$AW_k = \frac{I_k \cdot R}{k},$$

где k — коэффициент пропорциональности между э. д. с. и ампервитками.

Но ампервитки серийной обмотки при коротком замыкании

$$I_k \cdot W_s = AW_1 - \frac{I_k \cdot R}{k} = \frac{AW_{g0}}{\psi + 1} - \frac{I_k \cdot R}{k},$$

откуда

$$W_s = \frac{\frac{AW_{g0}}{\psi + 1} - \frac{I_k \cdot R}{k}}{I_k}.$$

То же равенство дает возможность найти I_k при заданном W_s .

Нужно отметить, что в самые последние годы система Леонарда с трехобмоточным генератором эффективно вытесняется системами с амплидином и роторолем.

97. Способы компенсации влияния остаточного магнетизма и омического падения напряжения в системе Леонарда

В некоторых случаях применения электроприводов чрезвычайно важно иметь изменение скорости двигателя постоянного тока, строго фиксированное положением ручки регулирующего реостата или соответствующей комбинацией включения реле и контакторов. Это обстоятельство существенно для ряда металлорежущих станков, для некоторых прокатных станов. Особо важное значение оно имеет для шахтных подъемников и лифтов по соображениям безопасности их работы. В этих подъемниках необходимо совершенно точно фиксировать закон замедления клетей и кабин и получить остановку в совершенно определенном месте.

На напряжение генератора, а следовательно, и на скорость двигателя в системе Леонарда, кроме тока возбуждения генератора, могут влиять три фактора: 1) реакция якоря; 2) омическое падение напряжения; 3) остаточный магнетизм. Влияние реакции якоря в таких случаях может быть легко устранено применением на генераторе и двигателе компенсационных обмоток. Влияние остаточного магнетизма при выключении тока возбуждения гене-

ратора приходится устранять питанием обмотки возбуждения генератора током, создающим магнитный поток, который направлен навстречу остаточному магнетизму и уничтожает его. В ряде реверсивных установок Леонарда обмотка возбуждения генератора в целях уничтожения при остановке остаточного магнетизма переключается от возбuditеля на зажимы генератора при соблюдении необходимого для этой цели приключения концов обмотки возбуждения к щеткам. Такой процесс носит наименование самогашения поля генератора. Если бы влияние остаточного магнетизма не было ликвидировано, то в отдельных случаях замедление и остановка двигателя могли бы протекать ненормально с точки зрения безопасности. В самом деле, существование остаточного магнетизма в железе машины ведет к тому, что при отсутствии тока возбуждения или при слабом токе возбуждения генератор имеет относительно большое напряжение. Это последнее в рассматриваемых условиях повышается еще больше влиянием добавочных полюсов, имеющих последовательную обмотку. В ряде случаев это привело бы к тому, что двигатель продолжал бы вращаться, хотя ручка управления была бы поставлена на нулевое положение. Наличие остаточного магнетизма в шахтных подъемниках могло бы вызвать переподъем клетей и их налет на направляющие шкивы с соответствующими тяжелыми последствиями. В металлорежущих станках влияние остаточного магнетизма могло бы вызывать неточность обработки, а иногда и аварийные последствия.

В некоторых последних схемах системы Леонарда с амплитудами с остаточным магнетизмом борются перемагничиванием машины переменным током частотой в 7 Hz.

Для уничтожения влияния на скорость двигателя омического падения напряжения в цепи генератора и двигателя применяются различные специальные схемы [Л. 1].

98. Необходимость и способы быстрого возбуждения генератора Леонарда

В некоторых электроприводах, приводимых в движение по системе Леонарда, например, в реверсивных прокатных станах, в вспомогательных механизмах при них — кантователях, манипуляторах и т. п., — строгальных станках и т. д. требуется очень большое число реверсирований, до 15—20 в минуту. В схемах привода с двигателями постоянного тока, питаемыми от неизменного напряжения, предел числа реверсирований при допустимых для двигателей токах ставится практически механической инерцией (GD^2) электропривода. С этой целью двигатели, пускаемые часто в ход, как уже отмечено ранее, конструируются с минимальным возможным маховым моментом. Выбор передаточного числа между двигателем и исполнительным механизмом производится так, чтобы приведенный маховой момент электропривода был наименьшим.

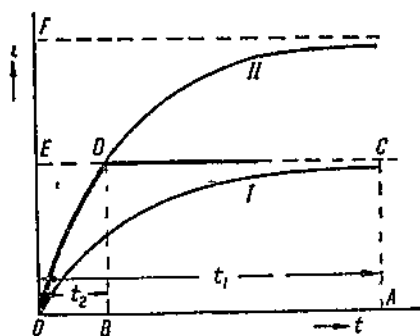
В системе Леонарда необходимо учитывать дополнительно второй род инерции — электромагнитную инерцию обмотки возбуждения генератора. Если при данном маховом моменте электропривода мы в системе Леонарда не применим некоторых мер борьбы с электромагнитной инерцией, то нужного числа реверсирований электропривода не получим. Особенно существенным это обстоятельство оказывается в генераторах Леонарда мощностью 3 000—4 000 kW, питающих реверсивные прокатные станы и имеющих электромагнитную постоянную времени обмотки возбуждения в 2—4 сек. При реверсировании двигателя изменением потока возбуждения генератора мы должны в короткий период времени изменить направление магнитного потока генератора на обратное. Самоиндукция обмотки возбуждения, вызывая соответствующую э. д. с., равную $(-L \frac{di}{dt})$, препятствует быстрому изменению тока возбуждения. В таких случаях для уменьшения задерживающего влияния электромагнитной инерции обмотки возбуждения приходится принимать особые меры.

Получаемые при этом схемы могут быть названы схемами быстрого возбуждения машин, или, как еще говорят, схемами форсировки возбуждения машин. Посредством быстрого возбуждения можно достигать выполнения необходимого процесса за время, в несколько раз меньшее, чем без него.

Самый простой и наиболее часто применяемый способ борьбы с электромагнитной инерцией заключается в том, что в момент начала возбуждения машины на обмотку возбуждения дают напряжение, превышающее номинальное напряжение, примерно в два-три раза. Как известно, в цепи с самоиндукцией при включении ее на неизменное напряжение постоянного тока ток растет по закону

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$

Экспоненциальный закон изменения тока (в пренебрежении влиянием токов Фуко) при нормальном напряжении на зажимах обмотки возбуждения представлен на фиг. 262 кривой *I*. Если мы для укорочения промежутка времени t_1 , в течение которого ток достигает конечной величины $\frac{U}{R}$ (практически $t = (4-5) T$), дадим



Фиг. 262. Изменение тока при быстром возбуждении.

на обмотку напряжение $2U$ (кривая II), то ток будет изменяться по закону

$$i = \frac{2U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}).$$

Очевидно, что необходимое значение $i_{\max} = \frac{U}{R}$ в этом случае будет достигнуто в значительно более короткое время t_2 . Если время t_1 приближенно принять в $5T$, то соотношение между t_1 и t_2 можно получить следующим образом:

$$i_{\max} = \frac{U}{R} = \frac{2U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t_2})$$

или

$$\frac{1}{2} = 1 - e^{-\frac{R}{L}t_2}$$

Считая, что электромагнитная постоянная обмотки возбуждения генератора Леонарда

$$T = \frac{L}{R} \approx \frac{t_1}{5},$$

получим

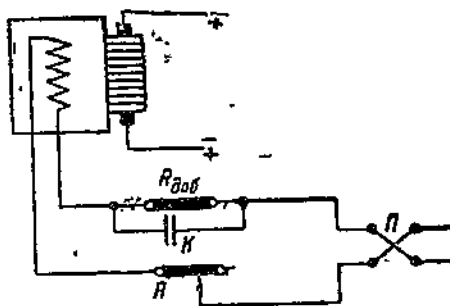
$$t_2 = \frac{t_1}{5} \ln 2,$$

откуда

$$t_2 \approx 0,14 t_1,$$

т. е. выигрыш во времени возбуждения генератора до нормального тока возбуждения получается примерно в семь раз.

Повышение напряжения на зажимах обмотки возбуждения в два-три раза достигается обычно шунтировкой на время быстрого возбуждения (форсировки) постоянного добавочного сопротивления $R_{доб}$, включенного в цепь обмотки возбуждения по схеме фиг. 263. Необходимо лишь принять меры, чтобы по достижении током нормального значения это добавочное сопротивление было снова включено. Включение и выключение сопротивления $R_{доб}$



Фиг. 263. Принципиальная схема быстрого возбуждения.

производится или посредством ручки управления или посредством специального контактора К.

Подобный метод быстрого возбуждения используется ХЭМЗ и фирмами GEC и Westinghouse в схемах реверсивных прокатных

станов. Фирма SSW, используя для этих целей квадратичную систему Леонарда, применяет его дважды — раз в цепи возбуждения главного генератора и второй раз — в цепи возбуждения возбуждителя генератора.

Другие способы быстрого возбуждения заключаются в применении специальных комбинаций машин [Л. 1]. В последнее время форсировка достигается применением схем с амплитудами, роторолями и регулексами [Л. 33', 249—251].

99. Переходные режимы в системе Леонарда

В шунтовых двигателях постоянного тока, питаемых от неизменного напряжения сети, влияние самоиндукции обмотки якоря на длительность переходных процессов сказывается сравнительно мало ввиду небольшой относительной величины этого коэффициента самоиндукции. Влияние реакции якоря на переходные токи в обмотке возбуждения, если оставить в стороне безреостатный пуск, часто практически не существенно. Поэтому, как уже отмечено выше, в практике с шунтовыми двигателями до последнего времени ограничивались преимущественно учетом механических переходных режимов, пренебрегая влиянием самоиндукции якоря.

В системе Леонарда переходные процессы протекают как в цепи возбуждения генератора, так и в цепи возбуждения двигателя (выше основной скорости). Так как цепи возбуждения обладают большой самоиндукцией, оказывающей весьма существенное влияние на работу электропривода, в первую очередь в отношении производительности, то в системе Леонарда учет электро-механических переходных режимов совершенно обязателен.

Рассмотрение этого вопроса в полном объеме пока не представляется возможным, вследствие неизученности в достаточной мере влияния токов Фуко [Л. 159]. Установление методики определения параметров эквивалентных цепей контуров токов Фуко стоит в порядке дня. Во всем последующем кратком изложении вопроса влиянием токов Фуко мы будем пренебрегать. Точно так же для упрощения математической обработки мы будем пренебрегать и влиянием реакции якоря. Аналитическим методом она учтена быть не может.

Для решения вопроса о переходных режимах в системе Леонарда необходимо написать уравнения механического и электрического равновесия системы электропривода. При решении этих уравнений можно учитывать или не учитывать насыщение генератора. Поскольку насыщение магнитной системы аналитическому учету не поддается, то решение вопроса при его учете должно производиться обязательно графо-аналитически. В пренебрежении насыщением с некоторыми упрощениями можно применить и аналитический метод. Таким образом мы имеем возможность использования двух следующих методов расчета переходных режимов системы Леонарда:

1. Аналитический метод, пригодный для ненасыщенных машин (генераторов). Этот метод детально разработан доц. МЭИ Д. П. Морозовым для скорости двигателя ниже основной [Л. 157];

2. Графо-аналитический метод, пригодный как для насыщенных, так и ненасыщенных машин. Широко применяется на ХЭМЗ [Л. 113]. Один из графо-аналитических методов для скорости двигателя выше основной разработан Морозовым.

3. В некоторых случаях качественного анализа возможно также применение упрощенного графического метода, основанного на принципе пропорций. Использование этого метода применительно к системе Леонарда дано доц. ЛПИ Соколовым. Объем и характер курса не дают возможности рассмотреть здесь все эти методы в полном объеме. Мы ограничимся изложением основ первого метода и краткими указаниями об особенностях двух других методов при работе двигателя до основной скорости. Более подробное рассмотрение вопроса можно найти в [Л. 156—167]. Напишем для системы Леонарда уравнение электрического и механического равновесия.

Для цепи возбуждения генератора можно написать

$$U_a = i \cdot r + L_g \cdot \frac{di}{dt}. \quad (517)$$

Для цепи якоря генератора и двигателя в пренебрежении реакцией якоря

$$E_g = I_a (R_g + R_d) + (L_g + L_d) \frac{dI_a}{dt} + E_d, \quad (518)$$

где

$$E_d = c \cdot n_d \cdot \Phi_d, \quad \text{а} \quad E_g = c \cdot n_g \cdot \Phi_g,$$

$(R_g + R_d) = R_a$ — соответственно сопротивления обмоток якоря генератора и двигателя с включением сопротивлений добавочных полюсов и контакта щеток, а L_g и L_d — соответственно коэффициенты самоиндукции тех же обмоток. При этом до основной скорости $\Phi_g = f(i_a)$; $\Phi_d = \text{const}$; $n_d = f(t)$.

Во всех случаях $n_g = \text{const}$. В ненасыщенной машине кроме того $\Phi_g = c_1 i_a$.

Поскольку реакцию якоря мы не учитываем, предполагая вполне компенсированные машины, то в равенстве для цепи возбуждения (517) влияние тока якоря отражения не нашло.

Напишем также 3-е уравнение — уравнение движения электропривода

$$M_d - M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (519)$$

Рассмотрим общий случай работы системы с быстрым возбуждением (форсировкой) при пуске. Обозначим коэффициент форсировки α . Под коэффициентом форсировки мы будем понимать отношение напряжения на зажимах обмотки возбуждения генератора

при пуске к напряжению на тех же зажимах при нормальной установившейся работе. Очевидно, что при отсутствии форсировки коэффициент α должен быть принят за 1.

В таком случае в течение всего процесса быстрого возбуждения, т. е. до разгона двигателя до основной скорости, можно написать

$$\alpha U_g = ir + L_g \frac{di}{dt}. \quad (520)$$

Решая это равенство, получаем

$$i = \frac{\alpha \cdot U_g}{r} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) = \alpha \cdot i_N (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (521)$$

где T — электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения, равная $\frac{L}{r}$, i_N — нормальный ток возбуждения генератора, Электродвижущая сила генератора в ненасыщенной машине

$$E_g = c_1 \cdot \Phi_g = c_2 i = c_2 \cdot \alpha \cdot i_N (1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$

Так как при i_N мы должны получать нормальное напряжение генератора U_N , то $c_2 \cdot i_N$ будет равно U_N .

Поэтому

$$E_g = \alpha \cdot U_N (1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$

Подставляя это равенство в (518), получим

$$\alpha U_N (1 - e^{-\frac{t}{T}}) = I_d R_a + (L_g + L_d) \frac{dI_d}{dt} + E_d. \quad (522)$$

В целях нахождения основных зависимостей $n = f_1(t)$ и $I_d = f_2(t)$ [а стало быть и $M_d = f_3(t)$], необходимо совместное решение уравнений (519) и (522). Совместное аналитическое решение их представляет известные затруднения. В целях упрощения и, как показывает опыт, без большой погрешности для практических целей в системе Леонарда ввиду сильного влияния на процесс самоиндукции обмотки возбуждения генератора, можно принять $L_g = 0$ и $L_d = 0$.

В таком случае получаются два уравнения

$$\alpha U_N (1 - e^{-\frac{t}{T}}) = I_d \cdot R_a + E_d, \quad (523)$$

$$M_d - M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (524)$$

Сначала решим эти уравнения совместно для скорости, а затем для тока якоря.

При $\Phi_a = \text{const}$ можно написать

$$M_a = k_1 \cdot I_a \quad (525); \quad M_m = k_1 I_s; \quad E_a = k_2 \cdot n \quad (526); \quad U_N = k_2 n_0. \quad (527)$$

Из (524) находим, что

$$I_a = \frac{GD^2}{375 \cdot k_1} \cdot \frac{dn}{dt} + I_s. \quad (528)$$

Подставляя (528) и (526) в (523), получим

$$R_a I_s + \frac{GD^2 \cdot R_a}{375 k_1} \cdot \frac{dn}{dt} + k_2 \cdot n = a U_N \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = a \cdot k_2 n_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (529)$$

или, деля на k_2 , будем иметь

$$\frac{GD^2 \cdot R_a}{375 k_1 k_2} \cdot \frac{dn}{dt} + n + \frac{R_a I_s}{k_2} = a n_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right).$$

Так как $\frac{GD^2 \cdot R}{375 k_1 k_2} = B$, электромеханической постоянной данного электропривода, то получаем

$$B \cdot \frac{dn}{dt} + n + \frac{R_a I_s}{k_2} = a \cdot n_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (530)$$

Выразим $\frac{R_a I_s}{k_2}$ несколько иначе.

Установившееся число оборотов двигателя при данном статическом моменте M_s будет равно $n_s = n_0 - \Delta n_s$, где n_0 — число оборотов в минуту идеального холостого хода при соответствующем напряжении

$$\frac{U_N}{k_2} = n_0 = n_s + \Delta n_s = \frac{E_s}{k_2} + \Delta n_s.$$

Очевидно,

$$\Delta n_s = \frac{U_N - E_s}{k_2} = \frac{I_s R_a}{k_2}.$$

Подставляя в (530) и деля на B , получаем

$$\frac{dn}{dt} + \frac{n}{B} = \frac{a n_0}{B} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) - \frac{\Delta n_s}{B}. \quad (531)$$

Полученное уравнение является линейным дифференциальным уравнением первого порядка вида

$$\frac{dy}{dx} + Py = Q$$

с общим интегралом вида

$$y = e^{-\int P dx} \left(\int Q e^{\int P dx} \cdot dx + C \right). \quad (531)$$

Применяя это решение к уравнению, имеем

$$n = e^{-\int \frac{dt}{B}} \left\{ \int \left[\frac{an_0}{B} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) - \frac{\Delta n_s}{B} \right] \cdot e^{\int \frac{dt}{B}} \cdot dt + C \right\}, \quad (532)$$

откуда

$$n = e^{-\frac{t}{B}} \left(\frac{an_0}{B} \cdot B \cdot e^{\frac{t}{B}} - \frac{an_0}{B} \cdot \frac{B \cdot T}{T - B} \cdot e^{-\frac{t}{T}} - \frac{\Delta n_s}{B} \cdot B \cdot e^{\frac{t}{B}} \right) + C \cdot e^{-\frac{t}{B}}$$

или

$$n = an_0 - \Delta n_s - an_0 \cdot \frac{T}{T - B} \cdot e^{-\frac{t}{T}} + C \cdot e^{-\frac{t}{B}}. \quad (533)$$

Для получения основных выводов рассмотрим частный случай пуска электропривода вхолостую при $M_m = 0$.

При этом $\Delta n_s = 0$.

Определяем для этого случая подинтегральную постоянную C ; исходя из условия $n = 0$ при $t = 0$.

Получаем

$$C = -an_0 + an_0 \cdot \frac{T}{T - B} = \frac{an_0 B}{T - B}.$$

Подставляя в (533) при $\Delta n_s = 0$, имеем

$$n = \frac{an_0}{T - B} \left[T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) - B \left(1 - e^{-\frac{t}{B}} \right) \right]. \quad (534)$$

Таким образом скорость двигателя, как и следовало ожидать является функцией двух инерционных постоянных времени — постоянной электромагнитной инерции обмотки возбуждения генератора T , характеризующей постепенное нарастание э. д. с. генератора, и постоянной механической инерции (электрохимической постоянной) B , характеризующей прежде всего маховые массы привода. Первая определяется практически весом меди на полюсах генератора, вторая пропорциональна величине махового момента электропривода.

Для примера на фиг. 264 представлены законы нарастания скорости мощного электропривода типа реверсивного прокатного стана при $\alpha = 2,8$ для трех случаев.

Постоянная B во всех случаях принята равной 0,45 сек. Постоянная T имеет значения: для первой кривой 0,5 сек.; для второй — 1 сек.; для третьей — 1,5 сек.

Более подробно о влиянии соотношения B и T будет сказано далее.

В мощных электроприводах величина B мало влияет на характер разгона. Главную роль здесь играет электромагнитная инерция обмотки возбуждения генератора. Это обстоятельство дает возможность сравнительно просто сделать выводы о наиболее рациональном коэффициенте форсировки α для мощных приводов, базируясь на требовании наибольшей производительности. Рассмотрим, от чего зависит длительность пуска электропривода t_p .

При $t=4B$, значительно меньшем, чем t_p , величиной $e^{-\frac{t}{B}}$ в равенстве (534) можно пренебречь. В таком случае

$$n = \frac{\alpha n_0}{T - B} \left[T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) - B \right], \quad (534)$$

откуда

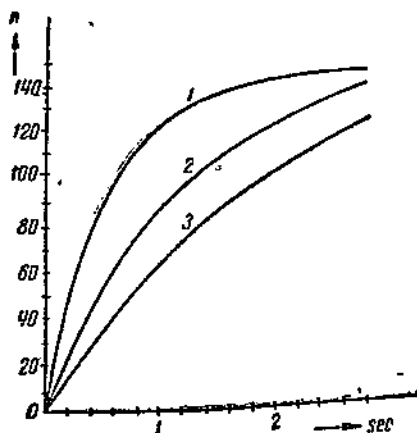
$$t_p = T \cdot \ln \frac{T \cdot \alpha}{(T - B)(\alpha - 1)}.$$

Пренебрегая опять-таки величиной B по сравнению с T , получим

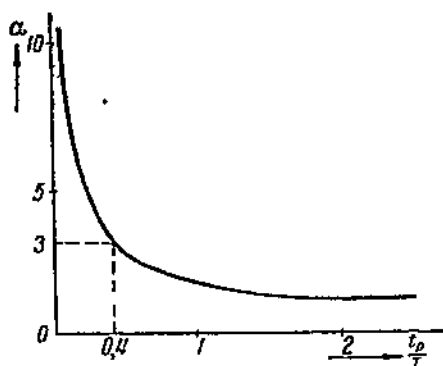
$$t_p = T \cdot \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}. \quad (535)$$

Кривая $\ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}$ в зависимости от α представлена на фиг. 265.

Из нее видно, что время пуска t_p уменьшается значительно лишь до $\alpha < 3 \div 4$. Дальнейшее увеличение коэффициента форсировки



Фиг. 264. Изменение скорости электропривода при пуске по системе Леонарда для трех соотношений T и B .



Фиг. 265. Влияние коэффициента форсировки на время пуска в мощных электроприводах по системе Леонарда.

на время пуска особого влияния не оказывает, поэтому практически в таких приводах коэффициент форсировки принимают равным $3 \div 4$.

Рассмотрим особенности пуска электропривода под нагрузкой при $M_m = \text{const}$. Разницей между статическим моментом покоя и вращения пренебрегаем. Двигатель берет с места, когда его вращающий момент достигает величины M_m . Это будет по истечении промежутка времени t_1 при условии

$$M_m = k_1 \cdot I_d = k_1 \cdot I_s.$$

При этом

$$I_s = \frac{aU_N \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right)}{R_d}, \quad (536)$$

так как E_d еще равно нулю.

Из (536) находим

$$e^{-\frac{t_1}{T}} = \frac{aU_N}{aU_N - I_s \cdot R_d}$$

или

$$t_1 = T \ln \frac{aU_N}{aU_N - I_s R_d} = T \ln \frac{an_0}{an_0 - \Delta n_s}. \quad (537)$$

Для определения постоянной C обратимся к равенству (532), подставляя в него $n=0$ при $t=t_1$.

В таком случае

$$C \cdot e^{-\frac{t_1}{B}} = an_0 \cdot \frac{T}{T-B} e^{-\frac{t_1}{T}} - an_0 + \Delta n_s,$$

откуда

$$C = an_0 \frac{T}{T-B} e^{\frac{t_1(T-B)}{T \cdot B}} - (an_0 - \Delta n_s) e^{\frac{t_1}{B}}. \quad (538)$$

Подставляя C в равенство (532), получим при

$$M_m = \text{const} \neq 0$$

$$\left. \begin{aligned} n = an_0 - \Delta n_s - an_0 \frac{T}{T-B} e^{-\frac{t}{T}} + an_0 \frac{T}{T-B} e^{\frac{T-B}{TB} \cdot t_1} \cdot e^{-\frac{t}{B}} - \\ - (an_0 - \Delta n_s) e^{\frac{t_1}{B}} e^{-\frac{t}{B}} = (an_0 - \Delta n_s) \left(1 - e^{-\frac{t_1-t}{B}}\right) + \\ + an_0 \frac{T}{T-B} \left(e^{-\frac{Bt_1 + Tt_1 - tT}{TB}} - e^{-\frac{t}{T}}\right); \end{aligned} \right\} (539)$$

При пользовании равенством (539) необходимо иметь в виду, что до $t < t_1$ оно не имеет физического смысла.

По этому равенству и может быть определен для каждого частного случая закон изменения $n=f(t)$ при $M_m = \text{const} \neq 0$.

Полученное выражение (539) оказывается для дальнейших выводов несколько сложным и сильно стиличным от вида выражения для n при холостом ходе (533). Выражение для n при $M_m = \text{const}$ получается для выводов более простым и удобным, если мы примем для момента времени t_1 производную $\frac{dn}{dt} = 0$. Практически это можно сделать в силу того, что начальное нарастание скорости идет очень медленно.

В самый момент трогания $\frac{dn}{dt} = 0$, так как инерционный ток равен нулю.

В таком случае

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=t_1} = 0 = an'_0 \frac{1}{T-B} e^{-\frac{t_1}{T}} - \frac{1}{B} \cdot C \cdot e^{-\frac{t_1}{B}}, \quad (540)$$

откуда

$$C = an_0 \cdot \frac{B}{T-B} e^{-\frac{t_1(B-T)}{B \cdot T}}. \quad (541)$$

Обозначая величину $e^{-\frac{t_1(B-T)}{BT}} = \gamma$ (542) и подставляя в (532), получим

$$\begin{aligned} n &= an_0 - \Delta n_s - \frac{an_0}{T-B} \left(T \cdot e^{-\frac{t}{T}} - B \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{t}{B}} \right) = \\ &= \frac{an_0}{T-B} \left[T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) - B \left(1 - \gamma \cdot e^{-\frac{t}{B}} \right) \right] - \Delta n_s. \end{aligned} \quad (543)$$

При дальнейших выводах мы будем пользоваться упрощенным уравнением (543). Оно дает практически достаточную точность. Равенство (543) может быть также применено и при холостом ходе. Для этого в нем нужно положить $\Delta n_s = 0$ и $\gamma = 1$.

Второй весьма характерной величиной для электрического переходного процесса в двигателе постоянного тока является сила тока якоря I и ее максимум I_{\max} . Решение для силы тока удобнее всего получить из равенства (528), подставляя в него значение производной $\frac{dn}{dt}$, полученной из (543)

$$\frac{dn}{dt} = \frac{an_0}{T-B} \left(e^{-\frac{t}{T}} - \gamma \cdot e^{-\frac{t}{B}} \right).$$

В таком случае по (528)

$$I_d = I_s + \frac{GD^2}{375 k_1} \cdot \frac{dn}{dt} = I_s + \frac{GD^2}{375 k_1} \cdot \frac{an_0}{T-B} \left(e^{-\frac{t}{T}} - \gamma \cdot e^{-\frac{t}{B}} \right). \quad (544)$$

Таким образом ток главной цепи системы Леонарда при пуске под нагрузкой состоит из постоянной составляющей статического тока $I_c = \frac{M_m}{k_1}$ и переменной динамической составляющей, имеющей сложное выражение. При пуске электропривода вхолостую $I_c = 0$ и динамическая составляющая тока при $\gamma = 1$ будет

$$I_{dj} = \frac{GD^2}{375 \cdot k_1} \cdot \frac{\alpha n_0}{T-B} (e^{-\frac{t}{T}} - e^{-\frac{t}{B}}).$$

Заменяем в (544) величину махового момента через B

$$GD^2 = \frac{375 \cdot k_1 k_2 \cdot B}{R_a}.$$

Далее учтем, что $k_2 \cdot n_0 = U_N$, а $\frac{U_N}{R_a}$ есть ток короткого замыкания системы I_k при U_N в покое двигателя.

Тогда

$$I_d = \frac{\alpha \cdot I_k \cdot B}{T-B} (e^{-\frac{t}{T}} - \gamma \cdot e^{-\frac{t}{B}}) + I_c, \quad (545)$$

или при холостом ходе

$$I_{d0} = \frac{\alpha I_k \cdot B}{T-B} (e^{-\frac{t}{T}} - e^{-\frac{t}{B}}). \quad (546)$$

Найдем максимальное значение пускового якорного тока. Для этого возьмем производную от (545) и приравняем ее нулю:

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{\alpha \cdot I_k \cdot B}{T-B} \cdot \left(\frac{\gamma}{B} \cdot e^{-\frac{t}{B}} - \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \right) = 0. \quad (547)$$

Очевидно, что момент времени t_{\max} , при котором получается I_{\max} , при $T \neq B$ будет равен

$$t_{\max} = \frac{T \cdot B}{T-B} - \ln \frac{\gamma \cdot T}{B}. \quad (548)$$

Подставляем значение $t = t_{\max}$ в (570)

$$I_{\max} = \frac{\alpha \cdot I_k \cdot B}{T-B} (e^{-\frac{t_{\max}}{T}} - \gamma \cdot e^{-\frac{t_{\max}}{B}}) + I_c. \quad (549)$$

Согласно предыдущему

$$\gamma = e^{\frac{-t_1(B-T)}{B \cdot T}} \quad (542), \quad t_1 = T \ln \frac{\alpha n_0}{\alpha n_0 - \Delta n_c}. \quad (537)$$

Беря эти два равенства, а также (548) и подставляя их в (549), учитывая при этом, что $e^{\ln x} = x$, получим [Л. 157]

$$I_{\max} = \frac{\alpha' I_k (a n_0 - \Delta n_s)}{\alpha n_0} \left(\frac{B}{T} \right)^{\frac{T}{T-B}} + I_s. \quad (550)$$

Соответственно при холостом ходе ($\Delta n_s = 0$ и $I_s = 0$)

$$I_{\max 0} = \alpha I_k \left(\frac{B}{T} \right)^{\frac{T}{T-B_1}}. \quad (551)$$

В случае мощных электроприводов, когда величиной B по сравнению с T можно пренебречь

$$I_{\max 0} = \frac{\alpha I_k \cdot B}{T}. \quad (552)$$

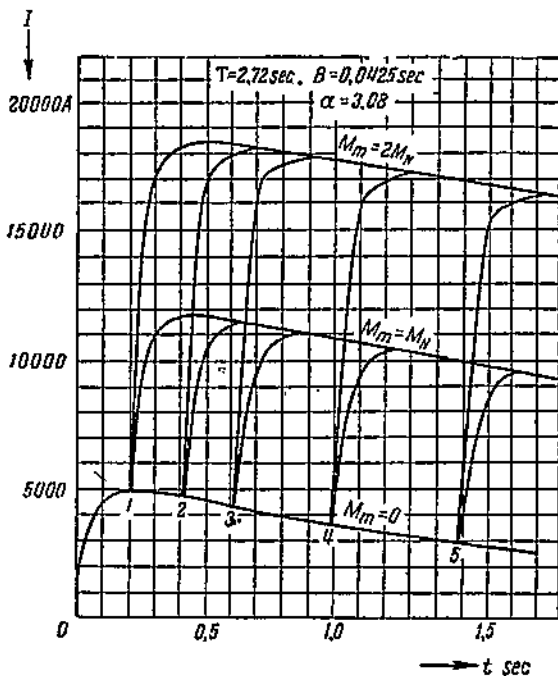
Таким образом максимальный ток в якоре мощных электроприводов, питаемых по системе Леонарда, прямо пропорционален току короткого замыкания в покое системы при напряжении U_N , прямо пропорционален коэффициенту форсировки α , прямо пропорционален маховому моменту электропривода и обратно пропорционален электромагнитной постоянной обмотки возбуждения генератора.

Из формулы (552) следует, что при $T=0$, $I_{\max 0} = \infty$. Однако подобный вывод получается в силу ряда принятых допущений. Очевидно, что максимум тока не может быть вообще больше величины αI_k . Характер кривых $I_a = f(t)$ для разных условий показан на фиг. 266.

Это получается из формулы (551) после раскрытия неопределенности. Кривые построены применительно к реверсивному прокатному стану при условиях пуска при $M_m = 0$, $M_m = M_N$ и $M_m = 2M_N$. Захват металла валками предусмотрен в различное время.

Интересно отметить, что в электроприводах мощных прокатных реверсивных станов мощностью двигателя в 5300 kW при пуске вхолостую в течение 1 сек. максимальный толчок тока (в силу малой величины отношения $B:T$) не превышает при правильном выборе коэффициента форсировки 80% номинального значения (Резолюции Всесоюзного совещания по электрооборудованию металлургических заводов, Харьков, 1938 г.).

Все приведенные выше окончательные выводы могут быть обобщены для разных соотношений T и B , если их привести к относительным единицам, беря за основной параметр отношение



Фиг. 266. Характер кривых $I=f(t)$ для разных условий пуска.

$\frac{B}{T} = \gamma$ [Л. 161]. Для примера возьмем лишь равенство, относящееся к холостому ходу:

$$n = \frac{\alpha \cdot n_0}{T-B} \cdot [T(1-e^{-\frac{t}{T}}) - B(1-e^{-\frac{t}{B}})], \quad (534)$$

$$I_{d0} = \frac{\alpha \cdot I_R \cdot B}{T-B} \cdot (e^{-\frac{t}{T}} - e^{-\frac{t}{B}}), \quad (546)$$

$$I_{\max 0} = \alpha \cdot I_R \cdot \left(\frac{B}{T}\right)^{\frac{1}{T-B}}, \quad (551)$$

$$t_{\max} = \frac{T \cdot B}{T-B} \cdot \ln \frac{T}{B}. \quad (548)$$

Принимая за 1 или 100% величины n_0 , I_R и измеряя время в масштабе $\tau = \frac{t}{T}$, можем написать скорость вращения в относительных единицах

$$v = \alpha \left[\frac{T}{T-B} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) - \frac{B}{T-B} (1 - e^{-\frac{t}{B}}) \right] =$$

$$= a \left[\frac{T}{T-B} - \frac{T}{T-B} \cdot e^{-\frac{t}{T}} - \frac{B}{T-B} + e^{-\frac{t}{B}} \frac{B}{T-B} \right] = \left. \begin{aligned} & \\ & = a \left(1 - \frac{1}{1-y} \cdot e^{-\tau} + \frac{y}{1-y} \cdot e^{-\frac{\tau}{y}} \right). \end{aligned} \right\} (553)$$

Соответственно ток в относительных единицах

$$i_{\psi} = a \left(\frac{y}{1-y} \cdot e^{-\tau} - \frac{y}{1-y} \cdot e^{-\frac{\tau}{y}} \right). \quad (554)$$

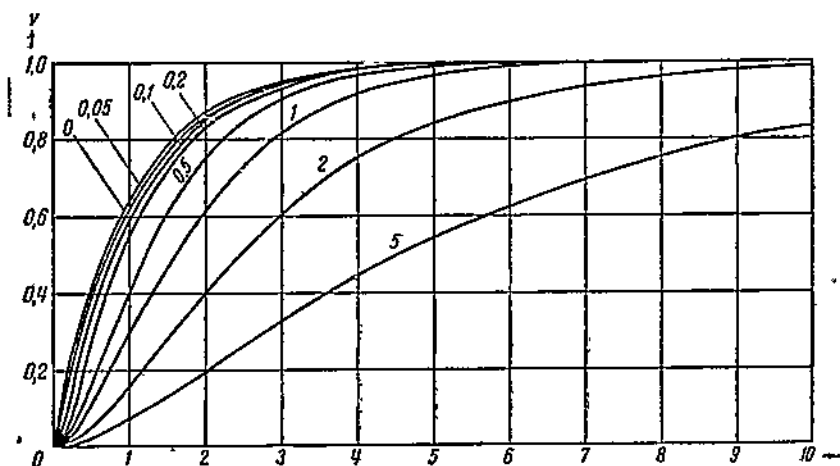
Максимальный ток

$$i_{\psi \max} = a \cdot (y)^{\frac{1}{1-y}} \quad (555)$$

и, наконец, время достижения максимума тока

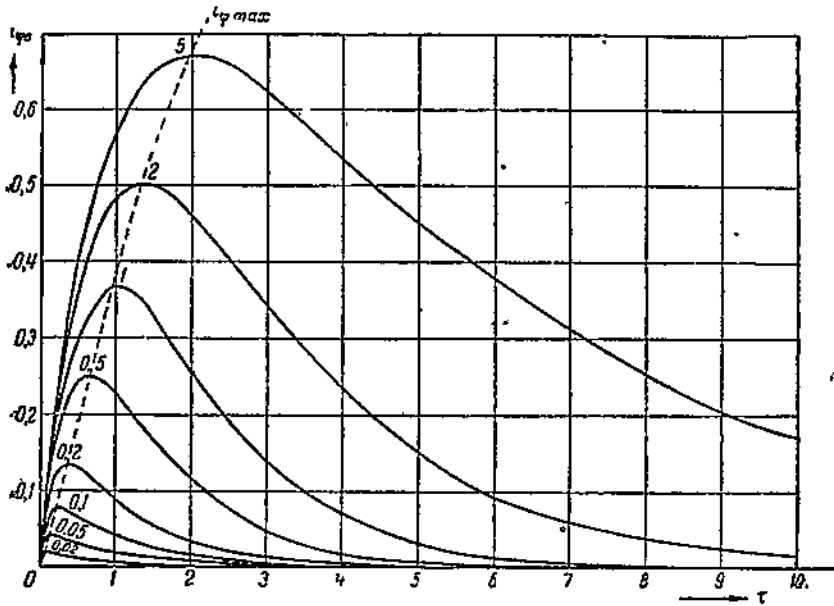
$$\tau_{\max} = \frac{1}{T} \cdot \frac{T \cdot B}{T-B} \ln \frac{T}{B} = \frac{y}{1-y} \cdot \ln \frac{1}{y}. \quad (556)$$

На фиг. 267 представлена зависимость $v=f(\tau)$ при $a=1$ для разных значений y . Практически значения y лежат в пределах от

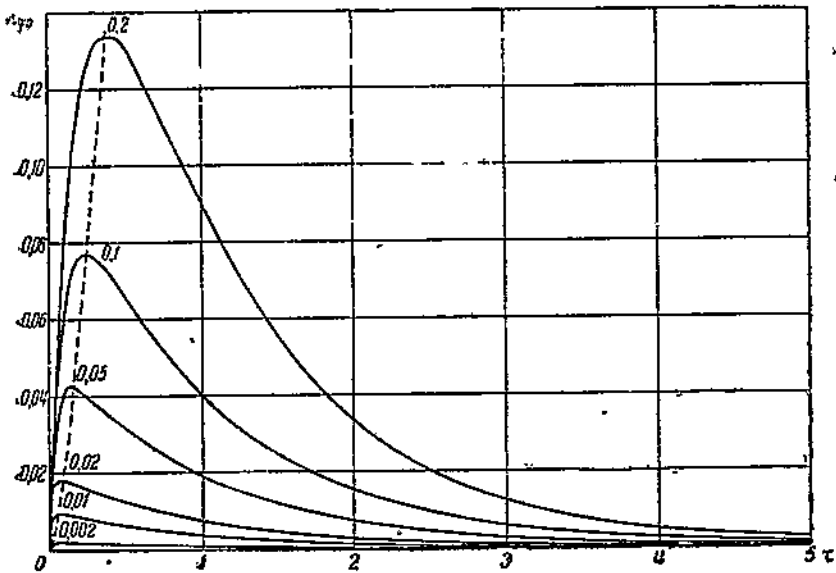


Фиг. 267. Кривые $v=f(\tau)$ для разных значений y .

0,01 до 1—2. Так, в реверсивных приводах типа реверсивных прокатных станов мощностью в несколько тысяч киловатт, $T=2 \div 4$ сек.; $B=0,03 \div 0,05$ сек. В приводах мощностью в несколько киловатт, $T=0,1 \div 0,3$ сек., $B=0,1-0,5$ сек. Кривые фиг. 267 показывают сравнительно малое влияние реального значения y на характер кривой $v=f(\tau)$.



Фиг. 268. Кривые $i_{\psi_0} = f(\tau)$ для разных значений u .



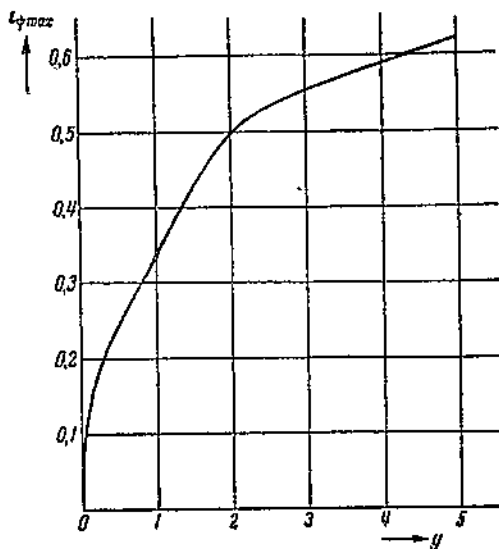
Фиг. 269. Кривые $i_{\psi_0} = f(\tau)$ для разных значений u .

На фиг. (268) и (269) показан характер кривых $i_{\psi} = f(\tau)$ для разных значений y . Из них видно, как сильно влияет на максимум тока и характер кривой величина y .

На фиг. 270 построена зависимость $i_{\psi_{max}}$ от y . Очевидно, что максимум кривой равен единице.

Приведенные кривые и могут быть использованы для практических расчетов. При этом необходимо иметь в виду, что они получены с рядом оговоренных выше допущений.

Расчет для тормозных режимов производится аналогично.



Фиг. 270. Зависимость $i_{\psi_{max}}$ от y .

100. Графо-аналитические методы расчета переходных режимов в системе Леонарда

Изложенный выше аналитический метод решения дифференциальных уравнений переходных режимов в системе Леонарда применим лишь для ненасыщенных машин и притом в пренебрежении самоиндукцией якоря и влиянием реакцией якоря. По тем же соображениям он не может быть применен к расчету работы двигателя системы Леонарда в переходных режимах выше основной скорости, т. е. при переменном магнитном потоке двигателя. Во всех этих случаях необходимо обратиться к той или иной форме графо-аналитического метода решения дифференциальных уравнений. Этот последний может быть использован во всех случаях, в том числе и тогда, когда желательно учесть условия работы электропривода при переменных параметрах. При тщательных вычислениях и построениях получаемая точность расчета по упомянутому методу оказывается практически вполне достаточной. Графо-аналитический метод расчета переходных режимов в системе Леонарда широко используется ХЭМЗ как для цепи возбуждения, так и для главной цепи. Для упрощения и без особого уменьшения практической точности подсчетов на ХЭМЗ коэффициентом самоиндукции якоря пренебрегают, полагая его равным нулю.

Основная методика графо-аналитического решения уравнений электромеханических переходных режимов электроприводов постоянного тока была изложена ранее в п. 72.

Особенность ее применения к системе Леонарда по сравнению с изложенным там заключается в том, что здесь рассматривается совместное решение трех дифференциальных уравнений: уравнения движения привода, уравнение цепи возбуждения генератора и уравнения главной цепи системы Леонарда. В последнее нужно подставлять значение переменной ε д. с. генератора, меняющееся в соответствии с законом изменения тока возбуждения генератора [Л. 113 и 167]. Детальный разбор методики графо-аналитического решения уравнений переходных режимов выходит за пределы курса; как уже отмечено выше, мы ограничимся здесь лишь основными замечаниями.

Решение уравнений приходится начинать с цепи возбуждения генератора. В насыщенной машине мы обязательно должны иметь заданной кривую $\Phi = f(i)$. По этой кривой естественно может быть найдена кривая $L = f'(i)$. Как известно, коэффициент самоиндукции обмотки возбуждения

$$L = L_a + L_{\sigma} = 2pw_2 \left(\frac{d\Phi_a}{dt} + \frac{\Phi_{\sigma}}{i_N} \right),$$

где L — полный коэффициент самоиндукции обмотки; L_a — коэффициент самоиндукции без учета потоков рассеяния; L_{σ} — коэффициент самоиндукции, обусловленный потоками рассеяния; $2p$ — число полюсов машины; w_2 — число витков на полюсе; Φ_a — полезный поток одного полюса по кривой намагничивания; Φ_{σ} — поток утечки одного полюса при нормальном токе возбуждения.

Уравнение цепи возбуждения может быть написано в виде

$$U - L \frac{di}{dt} = U - w \cdot \frac{d\Phi_g}{dt} = ir, \quad (557)$$

где $w = 2pw_2$, $\Phi_g = \Phi_a + \Phi_{\sigma}$.

Решение этого уравнения, приведенное ранее для ненасыщенной машины, предполагало $L = \text{const}$, что и дало возможность решить его аналитически. В насыщенной машине $L = \text{var}$ и, следовательно, необходимо графо-аналитическое решение этого уравнения. В пренебрежении влиянием реакции якоря это решение может быть получено графо-аналитическим методом сразу независимо от других уравнений. При учете реакции якоря необходимо совместное решение уравнения (557) с двумя другими. Перепишем (557) в виде

$$\frac{d\Phi_g}{dt} = \frac{U - ir}{w}. \quad (558)$$

Имея кривую $\Phi = f(i)$ и придавая i последовательно различные значения, можно построить указанным ранее методом кривую $\Phi_g = f(t)$ по равенству

$$dt = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} \frac{U - ir}{w} \cdot d\Phi. \quad (559)$$

Определение $\Delta\Phi$ для выбранного Δt производится согласно фиг. 271.

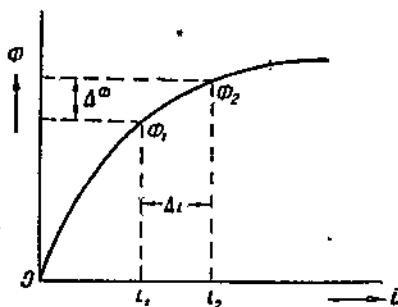
Тот же результат может быть получен и из (557) при $L=\text{var}$:

$$U = ir + L \cdot \frac{di}{dt},$$

$$dt = \frac{U - ir}{L} \cdot di,$$

откуда

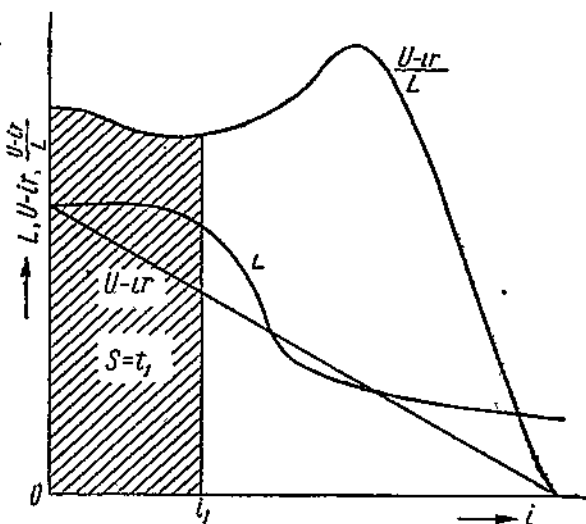
$$t = \int_{i_1}^{i_2} \frac{U - ir}{L} \cdot di. \quad (560)$$



Фиг. 271. Определение $\Delta\Phi$ для заданного Δt .

При пользовании равенством (560), имея кривую $L=f(i)$, полученную по кривой намагничивания, строим зависимость $\frac{U-ir}{L}$ от i . Да-

лее определяем последовательно интегралы (560) как площади фиг. 272. Получая таким образом зависимость t от i , можем построить кривую $\Phi_g=f(t)$. При постоянной скорости генератора эта кривая в некотором масштабе определяет графически закон изменения во времени э. д. с. генератора.



Фиг. 272. Определение Δt для заданного $\Delta\Phi$.

Переходим к двум другим уравнениям:

а) уравнение электрического равновесия в якорной цепи при $L_a=0$ будет

$$U_g = IR_a + E_d; \quad (561)$$

б) уравнение механического равновесия системы

$$M_d - M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn_d}{dt}. \quad (562)$$

Дифференцируя равенство (561), находим

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{R_a} \cdot \frac{dU_g}{dt} - \frac{1}{R_a} \cdot \frac{dE_d}{dt}. \quad (563)$$

Но $E_d = c_d \Phi_d \cdot n_d$; $U_g = c_1 \cdot \Phi_g \cdot n_g$, где $n_g = \text{const}$. Далее из (562)

$$\frac{dn_d}{dt} = \frac{M_d - M_m}{GD^2} = \frac{c_d \cdot \Phi_d}{GD^2} (I_d - I_s). \quad (564)$$

В случае работы двигателя до основной скорости $U_g = \text{var}$, $\Phi_d = \text{const}$. Подставляя все эти значения в (563), получим

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{R_a} \cdot \frac{dU_g}{dt} - (I_d - I_s) \cdot \frac{c_d^2 \cdot \Phi_d^2}{GD^2 \cdot R_a}. \quad (565)$$

В общем случае при $U_g = \text{var}$ и $\Phi_d = \text{var}$:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{R_a} \cdot \frac{dU_g}{dt} - (I_d - I_s) \frac{c_d^2 \cdot \Phi_d^2}{GD^2 \cdot R_a} - \frac{c_d}{R_a} \cdot n_d \cdot \frac{d\Phi_d}{dt}. \quad (566)$$

Так как $n_d = \frac{U_g - I_d R_a}{c_d \Phi_d}$, то, подставляя в (566), получаем в общем случае

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{R_a} \cdot \frac{dU_g}{dt} - (I_d - I_s) \frac{c_d^2 \cdot \Phi_d^2}{GD^2 \cdot R_a} + \frac{I_d}{\Phi_d} \cdot \frac{d\Phi_d}{dt} - \frac{U_g}{R_a \cdot \Phi_d} \cdot \frac{d\Phi_d}{dt}, \quad (567)$$

При работе двигателя выше основной скорости $U_g = \text{const}$ и уравнение получает вид

$$\frac{dI}{dt} = - (I_d - I_s) \cdot \frac{c_d^2 \cdot \Phi_d^2}{GD^2 \cdot R_a} + \left(\frac{I_d}{\Phi_d} - \frac{U_g}{R_a \cdot \Phi_d} \right) \cdot \frac{d\Phi_d}{dt}. \quad (568)$$

Методика графо-аналитического решения этого уравнения была приведена выше в п. 72. Кривая скорости может быть построена по равенству (564). Проверка правильности расчета может быть сделана путем сопоставления энергии, подаваемой исполнительному механизму электроприводом и равной

$$A_1 = \int_0^{t_1} U_g I_d dt = \int_0^{t_1} I_d^2 R dt \quad (569)$$

с живой силой, запасаемой электроприводом и равной

$$A_2 = \frac{J\omega^2}{2} = \frac{GD^2 \cdot n^2}{7200}. \quad (570)$$

При этом необходимо учитывать роль механических передач.

В равенстве (569) знак минус относится к двигательному режиму, знак плюс — к генераторному рекуперативному. Расхождение между (569) и (570) составляет при практических подсчетах обычно 3—4%.

Максимум тока в якорной цепи может быть найден приравниванием нулю соответствующей производной (565)

$$\frac{1}{R_a} \cdot \frac{dU_g}{dt} - (I_{\max} - I_s) \cdot \frac{c_d^2 \Phi_d^2}{GD^2 \cdot R_a} = 0,$$

откуда

$$I_{\max} = \frac{GD^2}{375 \cdot c_d^2 \cdot \Phi_d^2} \cdot \frac{dU_g}{dt} + I_s = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_{dN}^2}{E_{dN}^2} \cdot \frac{dU_g}{dt} + I_s, \quad (571)$$

где E_{dN} и n_{dN} — номинальные значения э. д. с. и числа оборотов в минуту двигателя.

Рассмотрим случай холостого хода, когда $I_s = 0$. Равенство (571) применительно к этому случаю показывает, что максимальный толчок тока при данных параметрах электропривода зависит лишь от степени форсировки цепи возбуждения, определяемой значением

величины $\frac{dU_g}{dt}$.

При грубых предварительных ориентировочных подсчетах три дифференциальных уравнения (557), (561), (562) могут решаться также совместно графически по принципу пропорций. При этом ток возбуждения строится графически по равенству

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{U - i r}{L_a},$$

где L_a берется из кривой $L_a = f(i)$.

После построения кривой $i = f(t)$ по имеющейся зависимости $\Phi_g = \varphi(i)$ находится кривая $\Phi_g = \psi(i)$.

Кривые тока и скорости строятся совместно по равенствам.

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{U - I_a R_a - E_d}{L_a} = \frac{c_g' \Phi_g - I_a R_a - c_d' d^2 d}{L_a},$$

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{M_d - M_m}{\frac{GD^2}{375}} = \frac{k_1 I_d - M_m}{\frac{GD^2}{375}}.$$

Изучению вопросов переходных режимов электропривода по системе Леонарда нашими научно-исследовательскими лабораториями и организациями (ВЭИ, МЭИ, ХЭМЗ, ЛИИ) в последние годы было уделено исключительно большое внимание. Причины этого кроются в весьма большом влиянии характера протекания переходных процессов на производительность исполнительных механизмов. Из них в первую очередь был выдвинут блуминг как основной реверсивный прокатный стан, по существу определяющий производительность по прокату всего металлургического завода. По блумингам и было проведено наибольшее количество теоретических и экспериментальных исследований. Затем соответствующие вопросы были рассмотрены применительно к приводу строгальных станков, вспомогательных механизмов блуминга, к приводу реверсивных станов холодной прокатки и копировальных станков с приводом по системе Соколова. В соответствии с этим в целый ряд установок, выполненных в СССР инофирмами, внесен ряд существенных улучшений, в частности усовершенствована автоматическая схема управления электроприводом реверсивного прокатного стана [Л. 157, 167—169]. Исследования показали также целесообразность отказа в мощных электроприводах от квадратичной системы Леонарда и перехода на ординарную, обеспечивающую выигрыш во времени прокатки и более благоприятное протекание переходных процессов. Представилось возможным повысить допусканшиеся ранее на приводах блумингов ускорения и замедления. Теперь вопрос изучается в направлении использования амплитуды, ротороля и регулекса.

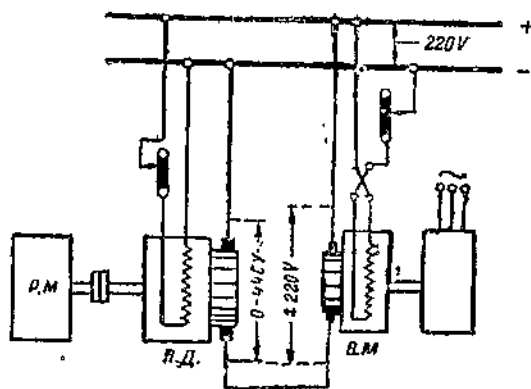
В заключение отметим, что в случае работы двигателя постоянного тока, приводимого по системе Леонарда, при низких числах оборотов в минуту, т. е. при малом насыщении при применении на генераторе для покрытия омического падения напряжения компаундной обмотки могут возникнуть колебания скорости двигателя. Рассмотрение соответствующих явлений дано в [Л. I, II часть, стр. 57—62].

Рассмотрение вопросов устойчивости системы Леонарда сделано акад. Никитиным и Куницким [Л. 165].

101. Система согласно-встречного включения

Положим, что мы имеем сеть постоянного тока с напряжением 220 В и хотим в широких пределах регулировать скорость некоторого двигателя постоянного тока. Возьмем этот двигатель на напряжение 440 В. Последовательно с двигателем введем вольтодобавочную машину на 220 В. Эта машина может вращаться или двигателем переменного тока (возможно и постоянного, но на практике во избежание излишнего преобразования энергии не применяется) или может быть посажена на один вал с главным генератором, если этот генератор предусмотрен для питания только рассматриваемого привода. Силу тока в обмотке возбуждения вольтодобавочной машины можно регулировать с помощью

реостата и переключателя (фиг. 273) от $(+i_{\text{омах}})$ до $(-i_{\text{амах}})$ и тем самым можно менять напряжение вольтодобавочной машины от $(+220 \text{ V})$ до (-220 V) , направляя его или согласно с напряже-



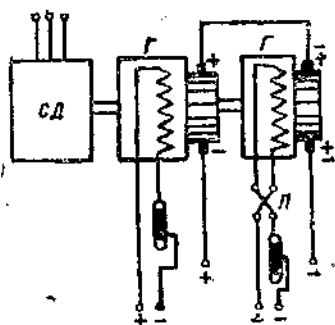
Фиг. 273. Система согласно-встречного включения.

нием сети или навстречу. Напряжения на зажимах двигателя будет равно алгебраической сумме напряжения сети и вольтодобавочной машины и может меняться в пределах от $(220 - 220) = 0$ до $(220 + 220) = 440 \text{ V}$.

Стало быть, такая система дает нам возможность производить регулировку напряжения на зажимах двигателей, а следовательно, и их скорости совершенно плавно от нуля до максимума путем изменения тока возбуждения вольтодобавочной машины. От обычной системы Леонарда система согласно и встречного включения отличается тем, что мощность вольтодобавочной машины, используемой для регулирования, будет в два раза меньше, чем мощность главного двигателя, что при общей сети постоянного тока (т. е. при общем генераторе большой мощности) иногда дает известные преимущества.

Недостаток подобной системы заключается в том, что двигатель, приводящий рабочую машину, должен быть взят на напряжение в два раза большее, чем напряжение сети, т. е. чем напряжение остальных двигателей.

Подобная система по схеме фиг. 274 применялась фирмой АЕГ для привода бумагоделательных машин. В ней главный генератор



Фиг. 274. Система согласно-встречного включения для бумагоделательных машин.

берется половиной мощности по сравнению с двигателем механизма. Работая при полной скорости, двигатель вторую половину мощности получает от вольтодобавочной машины. Обе машины совершенно одинаковой мощности сидят на общем валу и приводятся в движение в современной практике синхронным двигателем. У нас установлены четыре таких агрегата: 1) на фабрике им. Горького в Ленинграде; 2) на Кондопожском комбинате; 3) на Балахнинском комбинате; 4) на Вишерском комбинате.

В системе согласно-встречного включения нерегулируемый генератор или аналогичная ему сеть всегда работает в генераторном режиме. Что же касается вольтодобавочной машины, то при сложении ее напряжения с напряжением нерегулируемого генератора она работает как генератор, при встречном включении — как двигатель.

Преимуществом системы согласно-встречного включения по сравнению с системой Леонарда при общей сети постоянного тока является то обстоятельство, что в вольтодобавочном агрегате при максимальной скорости двигателя преобразованию подвергается лишь половина энергии, подводимой к двигателю. Сеть дает мощность UI и вольтодобавочная машина также дает UI . Суммарная мощность будет равна $2UI$. Если бы мы осуществили систему Леонарда, то в таком случае при общей сети постоянного тока мы должны были бы преобразовать мощность $2UI$. Мощность преобразовательного агрегата уменьшается в два раза, соответственно уменьшаются и потери на преобразование энергии. Поскольку в современной практике на всех предприятиях имеется переменный ток, то система согласно-встречного включения в чистом описанном выше виде утратила свое значение и экономически конкурировать с системой Леонарда не может. Фирма АЕГ сохранила эту схему для бумагоделательных машин в силу историко-патентных причин. Наши заводы и все другие инофирмы применяют в таких случаях систему Леонарда. В отдельных случаях применения последней оказывается иногда целесообразным использование вольтодобавочных машин, но не на полное напряжение.

102. Регулирование скорости двигателей постоянного тока нонно-электрическими аппаратами

Наряду с вращающимися преобразователями переменного тока в постоянный в практике электропривода последнего времени стали применяться различные ионные преобразователи (вентили), принцип работы которых, как известно, основан на электрическом разряде между двумя электродами, помещенными в закрытый сосуд. Основным характерным свойством этих аппаратов является то, что они пропускают ток только в одном определенном направлении от анода к катоду.

Указанные вентили делятся на три основных группы: 1) электронные или высоковакуумные; 2) ионные или газонаполненные; 3) повышенного давления — дуговые вентили Маркса. Первая группа вентилей, обладающая полной управляемостью процессом в любой момент времени, почти не нашла применения в практике для питания электропривода вследствие сильного влияния в них отрицательного объемного заряда, резко снижающего к. п. д. этих аппаратов. Они используются в приводе лишь в качестве аппаратов управления — реле, регуляторов.

Вентили Маркса, предложенные последним в 1931 г., пока еще находятся в стадии экспериментальных исследований и в основном изучаются преимущественно для работы при очень высоких напряжениях постоянного тока, измеряющихся десятками, сотнями киловольт и выше. Так, Марксом был испытан вентиль на 100 кВ, 100 А при к. п. д. $\eta = 97-99\%$. В практике электропривода эти группы аппаратов вряд ли найдут применения.

Для целей электропривода может быть использована и используется лишь вторая группа газонаполненных вентилей, не обладающих вообще полной управляемостью для любого момента времени. Управляемые вентили этой группы изготавливаются трех категорий: ртутные выпрямители, тиратроны и игнитроны. Анодом во всех случаях служит графит или железо, в качестве катода применяется или оксидированный никель (тиратрон), либо жидкая ртуть (ртутник, игнитрон). Игнитрон отличается от нормальных ртутных выпрямителей применением специального карборундового зажигающего, погруженного в катод из жидкой ртути. Питание током зажигающего в соответствующие моменты дает возможность вводить игнитрон в работу.

Все три перечисленных категории газонаполненных вентилей могут быть изготовлены как в стеклянных сосудах, так и в железных. При больших мощностях по условиям необходимости в охлаждении применяются железные сосуды. Стеклянные ртутные выпрямители и газотроны изготавливаются пока практически на силу выпрямленного тока в 350 А и выше при 600 В. Советские стеклянные выпрямители выпускаются на силу тока 100 А при промышленном напряжении постоянного тока. Игнитроны за границей построены на силу тока до 500 А при допустимой амплитуде напряжения в 900 В. Наши советские игнитроны изготовлены пока на силу тока 150—200 А при допустимой амплитуде напряжения между катодом и анодом в 1 000—1 200 В. Что же касается металлических ртутных выпрямителей, то они изготавливаются в СССР заводом „Электросила“ им. С. М. Кирова на силы тока 500 (600), 1 000 (1 100), 2 000, 3 000, 5 000 А при напряжении постоянного тока 600 В. В скобках даны цифры, относящиеся к напряжению в 230—460 В. Для целей тяги изготавливаются ртутные выпрямители с напряжением в 1 650 В и выше на 400 и 2 000 А. При этом в случае регулирования сетками номинальный ток вы-

прямителя на 600 В с увеличением глубины регулирования снижается следующим образом:

% напряжения	95	90	80	0
% длительного тока	100	85	75	65

Для практики электропривода ионные вентили представляют двойной интерес. С одной стороны, в форме ртутных выпрямителей они используются для получения неизменного напряжения постоянного тока (металлургические и металлообрабатывающие заводы). С другой стороны, все вентили с регулируемой сеткой могут быть использованы для широкого регулирования скорости и, в частности, для замены системы Леонарда. Включение подобных аппаратов на сеть переменного тока производится через трансформатор.

Как и система Леонарда, схемы с ионными регулирующими вентилями дают возможность получать широкое регулирование скорости двигателя постоянного тока и при специальной компоновке схемы обуславливают возможность рекуперации и реверсирования. Однако перевод питаемого двигателя в рекуперативный режим требует двойного количества ионных аппаратов.

Одним из главных преимуществ ионного управления двигателями является практическая безинерционность выпрямителей. К числу недостатков схем привода с ионными аппаратами следует отнести увеличение потерь в двигателях за счет пульсации тока и ухудшение коммутации. Однако влиянием этих факторов, как показывают опыт и расчеты, при малых мощностях обычно можно пренебречь. Серьезным недостатком ртутных вентилях является ограниченность перегрузки при рекуперативном режиме и возможность обратных зажигания, против возникновения которых приходится принимать особые меры.

Идея регулирования напряжения постоянного тока ртутного выпрямителя или тиратрона посредством изменения напряжения на сетке заключается в следующем. В ртутном выпрямителе через каждый его анод ток проходит тогда, когда анод имеет положительный потенциал, т. е. в течение половины каждого периода переменного тока. Однако, если в течение этого полупериода мы подадим на сетку отрицательный потенциал, то ток не будет проходить от анода к катоду и при положительном потенциале первого. Причина этого кроется в том, что электроны, вылетающие из катода, не будут достигать анода, а будут стремиться обратно, встречая отталкивающее действие отрицательного потенциала сетки. Понятно, что для каждого анода выпрямителя должна быть своя регулирующая сетка.

Однако, если в какой-либо момент рассматриваемого полупериода переменного тока при положительном потенциале анода на сетку выпрямителя будет подан положительный потенциал, то начнется ионизация газа, пространство между анодом и като-

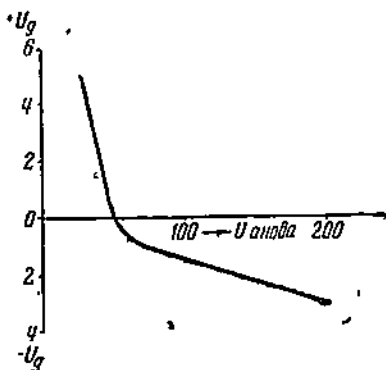
дом делается проводящим, и возникнет дуга. Новая подача отрицательного потенциала на сетку уже не может задержать протекания постоянного тока от анода к катоду в течение этого полупериода, так как отрицательный потенциал сетки уже будет компенсирован образовавшимся вокруг нее слоем положительных ионов. Ток будет существовать до конца полупериода, когда значение тока пройдет через нуль. Однако каждому напряжению между анодом и катодом соответствует то наименьшее значение отрицательного потенциала на сетке, при котором выпрямитель не проводит. Зависимость напряжения на сетке, необходимого для запирания тока при определенных напряжениях между анодом и катодом, представлена на фиг. 275. Если при напряжении переменного тока выпрямителя, равном U , отрицательное напряжение на сетке будет иметь значение меньшее U_g , то отрицательный потенциал сетки не сможет устранить возникновения тока. При некоторых значениях отрицательного напряжения на сетке выпрямитель не пропускает тока. Возникший в выпрямителе ток определяется всецело сопротивлением цепи и уже не зависит от величины отрицательного напряжения на сетке.

Напряжение постоянного тока ртутного выпрямителя является средним значением напряжения переменного тока. Если мы будем задерживать возникновение тока в каждой полуволне на один и тот же промежуток времени или на разные, то напряжение постоянного тока будет ниже, чем при отсутствии влияния сетки. При полном запирании тока — отрицательный потенциал сетки действует весь полупериод — напряжение постоянного тока будет равно нулю.

В управляемом ртутном выпрямителе среднее значение выпрямленного напряжения равно

$$E_d = E_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U \mp I_d \left(\frac{x_T \cdot p}{2\pi} + R_T \right), \quad (572)$$

где E_{d0} — среднее значение выпрямленного напряжения неуправляемого выпрямителя; α — угол запаздывания зажигания; ΔU — падение напряжения в дуге; I_d — среднее значение выпрямленного тока; R_T и x_T — активное и реактивное сопротивление фазы трансформатора; p — число фаз вторичной обмотки трансформатора. В приведенном равенстве знак (—) относится к двигательному режиму, знак (+) — к рекуперативному.



Фиг. 275. Зависимость запирающего напряжения на сетке от напряжения переменного тока.

Поскольку ртутный выпрямитель является ионным преобразователем переменного тока, весьма важно знать закон изменения его коэффициента мощности в зависимости от пределов регулирования напряжения постоянного тока. Действительный коэффициент мощности ртутного выпрямителя обуславливается двумя факторами: 1) регулированием напряжения и 2) искажением формы тока

$$\cos \varphi = \cos \varphi_{рег} \cdot \cos \varphi_{иск}.$$

Влияние $\cos \varphi_{иск} \approx 0,95$ на действительный $\cos \varphi$ сравнительно невелико, зато влияние $\cos \varphi_{рег}$ очень существенно. Из равенства для E_d следует, что в пренебрежении падением напряжения в дуге выпрямителя и в трансформаторе

$$E_d = E_{d0} \cdot \cos \alpha.$$

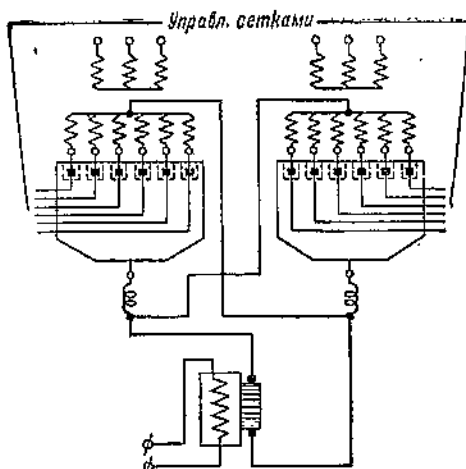
Так как ток сети и анода отстает от вызывающего их напряжения переменного тока на угол α , то

$$\cos \varphi_{рег} = \cos \alpha = \frac{E_d}{E_{d0}},$$

Следовательно, снижая выпрямленное напряжение постоянного тока в целях регулирования скорости двигателя, положим, вдвое, мы уменьшаем коэффициент мощности установки до цифры, немного низшей, чем 0,5. Грубо говоря,

$$\cos \varphi_{рег} = \frac{E_d}{E_{d0}} \approx \frac{n_1}{n_{d0}}.$$

Это обстоятельство является существенным недостатком регулирования скорости двигателей посредством ионных вентилей. Поэтому практически в установках средней и большей мощности предпочитают вести регулирование сеткой выпрямителя лишь в пределах $\pm 10\%$. При широком диапазоне регулирования скорости двигателей управление сеткой обычно комбинируют с переключением напряжения на вторичных зажимах трансформатора. В ряде случаев к установкам ионных вентилей для улучшения $\cos \varphi$ добавляют статические конденсаторы.

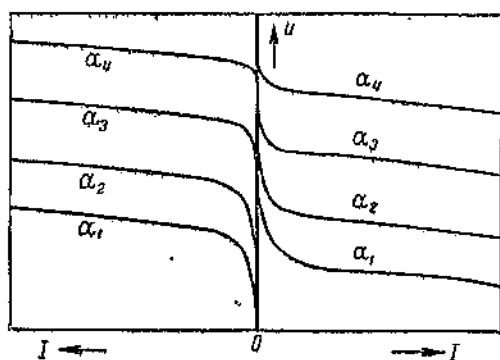


Фиг. 276. Схема питания реверсивного двигателя от двух шестифазных выпрямителей.

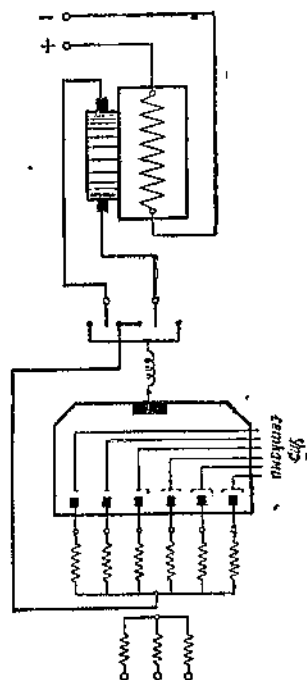
и питаемого ими реверсивного двигателя с рекуперативным тормозом показана на фиг. 276.

В этой схеме один выпрямитель пропускает ток в одном направлении — при двигательном режиме двигателя, второй — в другом направлении при генераторном режиме двигателя. При переходе на другое направление вращения двигателя роль ртутников в схеме меняется. Механические характеристики двигателя с независимым возбуждением, включенного по приведенной схеме, показаны на фиг. 277. Эти характеристики примерно одинаковы с характеристиками двигателя, питаемого от системы Леонарда, отличаясь от них лишь при малых нагрузках, когда характеристика получает неустойчивый серпесный характер из-за прерывистости тока [Л. 172—175].

Второй ртутный выпрямитель необходим лишь в том случае, когда питают реверсивный привод или хотят осуществить рекуперативный (инверторный)



Фиг. 277. Механические характеристики реверсивного привода, питаемого от ртутных выпрямителей.



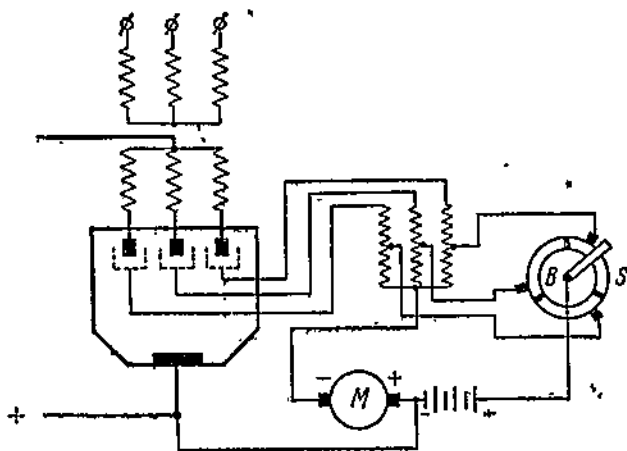
Фиг. 278. Питание реверсивного привода с переключением в главной цепи.

режим без переключения в главной цепи. Если такое переключение допустимо, то схема получает вид (фиг. 278). Тех же результатов можно было бы достичь изменением полярности на зажимах обмотки возбуждения двигателя, однако такой способ имеет недостаток замедления процессов самоиндукцией обмотки возбуждения двигателя и сводит на-нет всю безинерционность схемы цонного вентиля.

Задача сеточного управления ртутным выпрямителем или тиристорном заключается в своевременной подаче на сетку положительного потенциала, взамен имевшегося отрицательного, запиравшего вентиль. Подача этого положительного потенциала может производиться разными способами. Из них главными являются: 1) метод фазорегулятора (способ Тулона); 2) метод вращающего-

ся механического коммутатора. Напряжение на сетку может подаваться либо от аккумуляторной батареи, либо от той же сети переменного тока. Как в том, так и в другом случае можно либо совсем запереть ток, либо запереть его на определенную часть полупериода.

Регулирование момента подачи на сетку отрицательного напряжения от аккумуляторной батареи показано для трехфазного выпрямителя на фиг. 279. Синхронная подача напряжения на сетку производится посредством контактного диска S , вращаемого небольшим синхронным двигателем со скоростью, очевидно, строго совпадающей с изменением частоты тока, которой питается ртутный выпрямитель.



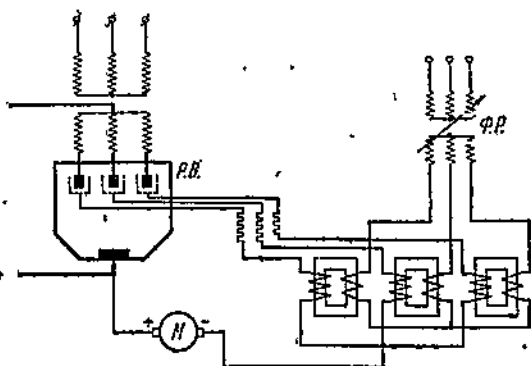
Фиг. 279. Регулирование напряжения шестифазного ртутного выпрямителя помощью коммутатора.

Контактный диск таким образом представляет аппарат, служащий для регулирования момента зажигания анодов. При работе выпрямителей сетка каждого анода нормально присоединена к отрицательному потенциалу и лишь на небольшой промежуток времени, соответствующий моменту зажигания, присоединяется в течение каждого полупериода тока к положительному потенциалу батареи. Перемещая неподвижную, опирающуюся на диск щетку с рукояткой B , можно регулировать длительность периода горения дуги за каждый полупериод.

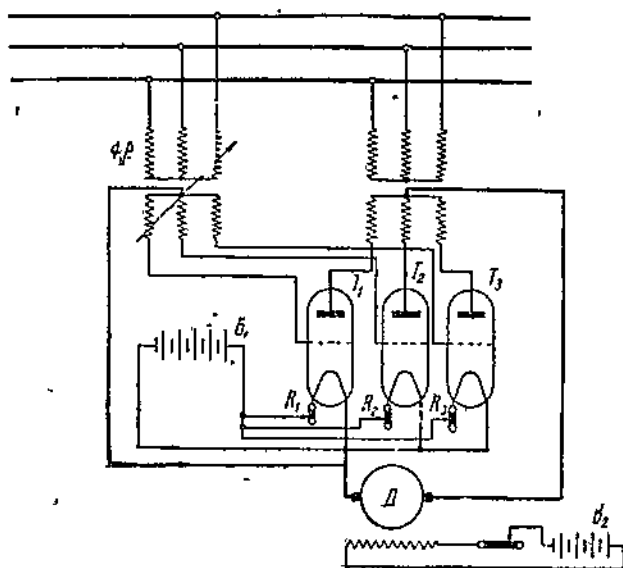
На фиг. 280 показано управление сетками выпрямителя с помощью фазорегулятора. Здесь отрицательный запирающий потенциал подается от машины постоянного тока M . Ее плюс связан с катодом, а минус с нулевой точкой специальных пиковых трансформаторов. Особенность последних заключается в том, что в силу большого насыщения они дают кривую напряжения пикообразной формы. Поскольку эти трансформаторы питаются через

фазорегулятор той же частотой, что и ртутный выпрямитель, то их пиковые напряжения имеют частоту сети. Поворачивая фазорегулятор, можно менять фазу пиков относительно анодного напряжения.

Первичные обмотки сеточных трансформаторов включены на фазорегулятор, вторичные же одним концом через сопротивления на сетки, другим концом через M к катоду. Схема включения регулируемого двигателя постоянного тока через тиратроны показана на фиг. 281 [см. также Л. 170-171]. Для регулирования напряжения на сетки в этом случае применен фазорегулятор Ф. Р.



Фиг. 280. Регулирование напряжения трехфазного ртутного выпрямителя с помощью фазорегулятора.



Фиг. 281. Питание регулируемого двигателя постоянного тока через тиратроны.

Как ртутный выпрямитель, так и тиратроны имеют определенные экономические преимущества перед системой Леонарда.

Так, стоимость ртутного выпрямителя с трансформатором и аппаратурой на 25—60% меньше стоимости двигателя-генератора, причем меньшая цифра относится к агрегатам мощностью в 300—500 kW, большая — к мощности в несколько тысяч киловатт. Установки ртутного выпрямителя не требуют фундаментов, потребный объем кубатуры здания также уменьшается. Применение ртутного выпрямителя дает также значительную экономию в меди и черных металлах, так как двигатель-генератор весит в два—четыре раза больше ртутного выпрямителя. К этому нужно добавить более высокий к. п. д. выпрямителей при напряжении в 600V и выше.

Для агрегатов мощностью в 3000 kW можно привести следующие сравнительные цифры к. п. д.

Напряжение постоянного тока в V	Коэффициент полезного действия ртутного выпрямителя	Коэффициент полезного действия системы Леонарда
900	95,5	91,5
600	93,5	91,6
400	92,0	91,3
330	91,5	91,5

Данные для к. п. д. агрегата в 3000 kW, 750V при разных нагрузках:

Нагрузка п %	Коэффициент полезного действия ртутного выпрямителя	Коэффициент полезного действия системы Леонарда
25	94,6	80,5
50	95,5	87,5
75	95,0	91,0
100	94,5	91,7
125	93,5	91,5

Первая полупромышленная установка регулируемого ртутного выпрямителя с рекуперативным (инвенторным) режимом была применена в Германии для привода аналогичного шахтному подъемнику [Л. 172]. Первая реверсивная опытная установка ртутного выпрямителя в СССР была намечена для подъемника на шахте им. Сталина, Ворошиловуголь [Л. 178].

Шведская фирма ASEA применила ионный тип привода под названием „Автостоп“ к обжимному нереверсивному стану мощностью 3000 kW (ASEA Journal, 1937, № 8). Фирма AEG применила привод от ртутного выпрямителя с длительной силой тока 400 A, $I_{\max} = 1000$ A для вертикальных валков универсального дуо стана, горизонтальные валки которого приводились паровой машиной.

Управляемые ртутные выпрямители были установлены на ряде нереверсивных прокатных станов в Германии: 1) на заготовочном стане 500 мм в восемь клетей с одним приводным двигателем; 2) на широкополосном стане с питанием двигателей от двух выпрямителей с силой тока каждого 2750 A, 600 V; 3) на листовом стане одним выпрямителем и $I_{\max} = 5340$ A, 750 V и двумя прокатными двигателями мощностью 890 kW каждый, 450/900 об/мин,

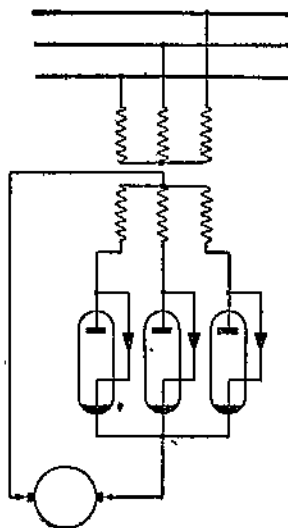
В этих установках кратковременная регулировка сеткой ведется при пуске двигателей на всем диапазоне. Длительная регулировка сеткой ограничена 10% вверх. Широкая регулировка скоростей двигателей достигается переключением напряжения трансформаторов. Сетка служит для регулировки между ступенями, обусловленными переключением трансформаторов. Для улучшения cos ϕ применены статические конденсаторы.

Регулируемые ртутные выпрямители с пределами регулирования $\pm 10\%$ применены у нас пока для регулирования напряжения в электролитических установках. Установок регулируемых ртутных выпрямителей на промышленных электроприводах у нас нет.

По существу аналогичное положение мы имеем и с тиратронами. Дальнейшие исследования и усовершенствования конструкции, несомненно, вызовут широкое распространение привода с питанием от ионных аппаратов для малых мощностей (из-за низкого cos ϕ). Что касается игнитронов, то соответствующие конструкции в СССР пока находятся в стадии разработки и усовершенствований, и электроприводы с ними находятся в начальной стадии развития.

Принципиальная схема включения двигателей постоянного тока через игнитроны показана на фиг. 282. Управление током поджигателя в схеме не предусмотрено. Пока у нас игнитроны были применены для питания агрегатов точечной сварки перед войной. Заводом Свердлова и ЛПИ (доц. Шляпошников) был спроектирован игнитронный привод строгального станка мощностью в 50 kW.

Игнитроны, как вентили с жидким ртутным катодом, имеют существенные преимущества перед тиратронами в отношении больших допустимых длительных и токовых перегрузок. Кроме того в отличие от тиратронов они не требуют предварительного прогрева: в этом отношении они одинаковы с ртутными выпрямителями. Перед последними игнитроны имеют преимущество отсутствия склонности к обратным зажиганиям, так как в отличие от многоаводных ртутных выпрямителей игнитроны имеют дугу лишь в течение рабочей части периода. Отсутствие насосной воздушной системы, малый габарит и стоимость, небольшой расход охлаждающей воды и ряд других обстоятельств также говорят в пользу игнитрона. Некоторые трудности в игнитронах возникают пока с процессом поджигания. Насколько в дальнейшем усовер-



Фиг. 282. Включение двигателя постоянного тока через игнитроны.

шенствуются и привьются игнитроны для целей привода, покажет будущее. Пока лишь можно отметить, что в силу большой перегрузочной способности игнитроны обладают несомненными преимуществами перед тиратронами для промышленных целей. В США за время войны игнитроны для электролитических целей установлены на несколько миллионов киловатт.

Вентильного двигателя [Л. 179—180], не имеющего пока значения для промышленности, мы здесь не касаемся. Частичное рассмотрение переходных режимов электроприводов ионными аппаратами дано в [Л. 173—174].

За последние годы в США нашел применение ионный привод под названием „Thymotrol“¹ — сокращение от Thyatron motor control. До мощностей в 3,75 kW он сделался одним из стандартных. В нем два тиратрона питают якорь, два других — обмотку возбуждения шунтового двигателя постоянного тока. Двигатель управляется группой электронных ламп. Ускорение привода проводится плавно при постоянной максимальной силе тока. Пределы регулирования от 1:40 до 1:120 в зависимости от мощности и характера момента нагрузки. Наибольшая мощность построенных подобных систем — 15 kW.

103. Краткое сопоставление различных систем регулирования скорости двигателей постоянного тока и пределы их применимости

Выводы о пределах применимости различных регулируемых систем постоянного тока можно делать лишь на базе технико-экономического сравнения их с регулируемыми системами переменного тока. Соответствующее сопоставление в сжатом виде дается в гл. X о выборе рода тока. В данном параграфе мы лишь кратко дадим суммарное резюме того, что было изложено выше.

Шунтовые и компаундные двигатели имеют нормальные экономические пределы регулирования скорости 1:3. Поэтому во всех тех случаях, где пределы регулирования не превосходят указанных цифр, возможно применение указанных типов двигателей. Практически их применяют обычно там, где имеется некоторое количество регулируемых двигателей и где оказывается целесообразным широкое использование постоянного тока с соответствующей заводской сетью. Практически это может иметь место на металлургических заводах и некоторых машиностроительных заводах. На этих последних шунтовые двигатели используются при многодвигательном приводе лобовых токарных станков, колесно- и вальцетокарных станков, станков для обточки шеек коленчатых валов, в крупных расточных станках с большим числом скоростей, в токарных фасонных и копировальных

¹ Таймтроль — название, данное американской фирмой GEC; фирма Вестингауз пользуется названием „Мототроль“.

станках, в крупных токарных станках для котло-, турбо- и генераторостроения, в вертикально-фрезерных станках, продольно-фрезерных станках, универсально-фрезерных станках с широкими пределами регулирования.

Серьезные двигатели постоянного тока оказываются весьма подходящими для ряда электроприводов повторно-кратковременного режима преимущественно в подъемно-транспортных установках. Они нашли исключительное применение для вспомогательных механизмов металлургических заводов и ряда крупных мощных кранов с большим количеством двигателей.

Одновременное регулирование скорости шунтовых двигателей сопротивляемыми в цепи возбуждения и в цепи якоря сохранилось преимущественно в старых установках — на отделочных механизмах текстильной промышленности, на небольших печатных машинах полиграфической промышленности, на каландрах резиновой промышленности, отделочных механизмах бумажной промышленности.

Последовательно-параллельное включение двигателей применяется в некоторых кранах и других подъемно-транспортных устройствах (доменный подъемник).

Пятипроводная система в современной практике вследствие своей громоздкости и высокой стоимости не применяется.

Трехпроводная система при наличии большого числа регулируемых двигателей сохранилась у нас и за границей почти исключительно в резиновой промышленности для каландров и тому подобных механизмов.

Исключительно широкое применение в современной практике получила система Леонарда в первую очередь из-за широких пределов регулировки скорости и простоты управления пуском, регулированием и торможением. Использование этой системы совершенно неизбежно там, где пределы регулирования скорости превышают соотношение 1:3.

Система Леонарда находит применение: 1) в реверсивных прокатных станах-блумингах и слябингах и регулируемых неревверсивных прокатных станах. В этих установках несколько генераторов, работающих параллельно, питают один или несколько двигателей. Для соответствующего распределения нагрузок между генераторами (а иногда и между двигателями) в машинах применяются специальные добавочные уравнивательные компаундирующие и противокомпаундирующие обмотки возбуждения [Л. 165—166]. Наибольшие мощности таких систем Леонарда по суммарной установленной мощности двигателей достигают 10 000—20 000 kW и даже выше. Система Леонарда находит также применение в станах холодной прокатки — как реверсивных, так и неревверсивных, тандем.

Система Леонарда с трехобмоточным генератором нашла применение прежде всего в приводе экскаваторов, в рудных перегружателях, при вращательном бурении, в электроприводе ледоколов.

В последнее время система Леонарда весьма широко применяется с возбудителями типа амплидинов, рототролей, регулексов (прокатные станы, строгальные станки, экскаваторы, доменные подъемники, пулеметные турели на самолетах и т. д.).

Система Леонарда находит применение в отдельных шахтных подъемниках или при большой глубине шахты, или при большой мощности подъемного двигателя или при специальных требованиях в отношении скоростей диаграммы подъемника. Исключительно широкое применение система Леонарда нашла у нас в многодвигательном приводе бумагоделательных машин. Из 26 таких электроприводов, установленных у нас в СССР в 1928 г., 22 оборудованы по системе Леонарда, остальные 4, как поставленные фирмой AEG, оборудованы по системе согласно-встречного включения. В таких установках обычно один генератор питает от 7 до 22 двигателей приводных секций с суммарной мощностью от 100 до 1000 kW. Широко применяется система Леонарда в последнее время в некоторых металлорежущих станках, как-то: быстроходных продольно-строгальных, крупных карусельных станках для турбо- и генераторостроения, спецпроизводств и т. д. В ряде металлорежущих станков необходимые условия регулирования подачи могут быть электрическим способом удовлетворены лишь системой Леонарда. Сюда относятся копировально-фрезерные станки, токарные фасонные и копировальные станки, круглошлифовальные станки. Использование системы Леонарда для подачи рабочего орудия находит применение и в других отраслях промышленности, например в луцильном дереворежущем станке, в нефтяном буровом станке, при регулировании подачи в дефибрах, в бумажной промышленности.

Система согласно-встречного включения применяется в современной практике почти исключительно в форме использования вольтодобавочных машин небольшой мощности в системе Леонарда в целях придания большей устойчивости электроприводам при низких скоростях или при каких-либо специальных требованиях в отношении регулирования, поддержания постоянства скорости и т. д.

В последние годы система Леонарда в ряде случаев начинает заменяться различными ионными или ионно-электронными аппаратами — ртутными выпрямителями с регулируемой сеткой, тиристорами, инверторами. Как уже отмечалось выше, ртутные выпрямители заменили систему Леонарда в ряде установок с нереверсивными прокатными станами, в отдельных установках со строгальными станками. Перспективы их применения рассмотрены в предыдущем параграфе. Будущее покажет, насколько широко смогут внедриться в жизнь ионные аппараты в тех приводах, где ранее применялась система Леонарда. Пока можно думать лишь о малых мощностях порядка 5—10 kW.

ГЛАВА VII

РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

104. Общие замечания

Из трех основных классов двигателей переменного тока: синхронных, асинхронных бесколлекторных и коллекторных, первый тип двигателей относится по существу к числу нерегулируемых, если не считать регулировки изменением частоты, применяемой на практике лишь в схемах синхронной передачи. Второй тип—асинхронный бесколлекторный—дает возможность получать регулировку, хотя в некоторых случаях и недостаточно экономично. Третий тип—асинхронный коллекторный—дает плавную, хотя и не всегда достаточно широкую регулировку, причем по стоимости оказывается высоким. Эти обстоятельства обусловили то, что при современном стремлении упростить и удешевить производственную машину и повысить ее производительность, а иногда и качество продукта за счет регулирования скорости, постоянный ток находит и будет находить широкое применение в промышленных установках.

Длительная борьба коллекторных двигателей переменного тока в промышленности в течение нескольких десятилетий до сих пор не дала им заметного перевеса над двигателями постоянного тока. Эти последние до настоящего времени имеют преимущественное распространение в регулируемых приводах. Однако необходимость преобразования переменного тока в постоянный при использовании двигателей постоянного тока вызывает значительные потери на преобразование энергии как в отношении капитальных затрат, так и в отношении расхода энергии.

Эти экономические обстоятельства заставляют в ряде регулируемых установок применять двигатели переменного тока.

Самым простым типом двигателя переменного тока является асинхронный бесколлекторный двигатель или коротко: асинхронный двигатель. Принципиально возможны следующие способы регулировки скорости асинхронного двигателя:

- а) Введение сопротивления в цепь ротора.
- б) Переключение числа пар полюсов.
- в) Каскадное включение двух или нескольких асинхронных ма-

шив. В практике промышленного привода в чистом виде применения почти не нашло.

- г) Изменение частоты питающего тока.
- д) Специальные типы двигателей.
- е) Каскадное включение с коллекторными машинами постоянного и переменного тока (для мощных установок).

105. Регулирование скорости асинхронного двигателя посредством сопротивления в цепи ротора

Введение в цепь фазного ротора асинхронного двигателя сопротивления дает возможность регулировать его скорость в широких пределах, но только с большими потерями. Такую регулировку практически возможно производить лишь при нагрузке, а не при холостом ходе, ибо при холостом ходе роторный ток очень мал, а потому возможность регулировки при холостом ходе очень ограничена.

Рассмотрим, как распределяется подведенная к асинхронному двигателю мощность в том случае, когда на всем пределе регулировки скорости вращающий момент рабочей машины остается постоянным, и мы хотим при помощи добавочного сопротивления в цепи ротора регулировать скорость двигателя от нуля примерно до синхронного числа оборотов. При $I_r = \text{const}$ мы можем считать, что на всем пределе регулировки скорости подведенная к двигателю мощность P_1 остается постоянной. Эта подведенная мощность

$$P_1 = M \cdot \omega_0.$$

Мощность $M \cdot \omega_0$ представляет мощность вращающегося магнитного поля. Мощность, которую будет брать наш исполнительный механизм, т. е. то, что мы называем полезной мощностью двигателя,

$$P_2 = M \cdot \omega_r.$$

Очевидно, что разность

$$p = P_1 - P_2 = M_2(\omega_0 - \omega_r),$$

в первом приближении равная $mI_r^2 R_r$, где R_r — активное сопротивление цепи ротора (при регулировке главным образом реостата), будет представлять собой не что иное, как потери в цепи ротора.

Представим изменение подведенной и полезной мощностей графически (фиг. 283).

Будем по оси абсцисс откладывать скольжение s , а по оси ординат — мощность P . При принятых нами допущениях подведенная мощность $P_1 = M \cdot \omega_0$ от $s=0$ до $s=1$ остается постоянной и представляется прямой, параллельной оси абсцисс. При скорости, близкой к синхронной, когда нет сопротивления в цепи ротора; вся подведенная мощность переходит в полезную. Наоборот, в покое двигателя, т. е. при $s=1$, вся подведенная мощность переходит в потери цепи ротора.

Выражение потерь p в цепи ротора $M(\omega_0 - \omega_r)$ может быть представлено так же, как $s \cdot S$, где s — скольжение.

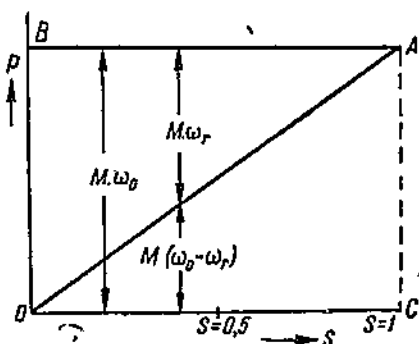
При $s=0$, $\omega_0 = \omega$ потери $p=0$.

При $s=1$, $\omega_r = 0$ потери $p = M \cdot \omega_0$.

Если мы соединим точку O с точкой A прямой линией, то отрезки верхней части (фиг. 283), равные $M\omega_r$, будут представлять полезную мощность двигателя. Отрезки нижней части, равные $M(\omega_0 - \omega_r)$, дают потери в резисторе.

График фиг. 283 показывает, что в случае постоянного момента нагрузки регулировка скорости асинхронного двигателя сопротивлением в цепи ротора чрезвычайно невыгодна.

По этим соображениям регулировка скорости асинхронного двигателя добавочным сопротивлением в цепи ротора при постоянном моменте нагрузки в случае длительного режима работы производится обычно только тогда, когда пределы изменения скорости не превышают 10—20%, даже при небольших мощностях и когда регулировка кратковременна. И только в случае повторно-кратковременного режима (преимущественно приводы подъемно-транспортных сооружений) пределы регулировки расширяются и при постоянном моменте нагрузки до 100%.



Фиг. 283. Распределение мощностей в асинхронном двигателе при регулировании его скорости в случае постоянного момента.]

106. Регулирование скорости асинхронных двигателей переключением числа пар полюсов

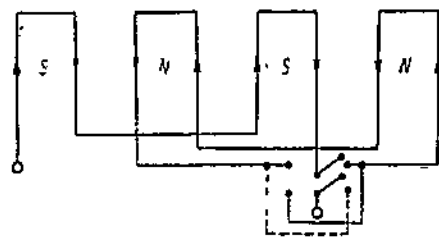
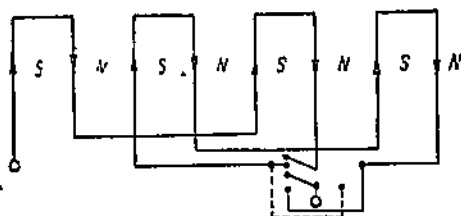
Асинхронный двигатель при нормальной нагрузке вращается с числом оборотов в минуту, близким к скорости синхронного вращающегося поля

$$n_0 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$$

Если статор асинхронного двигателя сконструировать с двумя обмотками или осуществить одну обмотку, предусмотрев возможности ее переключения на две комбинации пар полюсов, то получим двухскоростной двигатель со ступенчатой регулировкой скорости. В случае двух разных обмоток на статоре они могут быть сконструированы на любое число пар полюсов. Если же производится переключение одной и той же статорной обмотки, то легко и просто выполнимое соотношение полюсов определяется отношением 2. Очевидно, что при двух обмотках на статоре можно получить как трехскоростной, так и четырехскоростной двигатель.

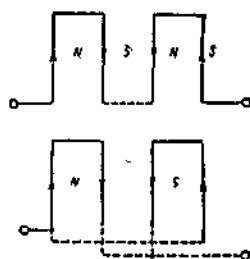
Так как переключение числа пар полюсов в роторе весьма усложнило бы и удорожило бы машину за счет добавочных колец, то в двигателях с переключением полюсов ротор устраивается за небольшими исключениями короткозамкнутым. Короткозамкнутый ротор всегда приобретает распределение м. д. с., соответствующее числу полюсов статорной обмотки. Идея этого переключения весьма проста и заключается в изменении взаимного соединения в половине катушек фаз. Принципиальная схема переключения показана на фиг. 284.

На нем показано переключение числа полюсов путем изменения направления тока в половине катушек обмотки при переключении с 8 полюсов на 4.



Фиг. 284. Переключение полюсов с изменением направления тока в половине катушек.

На фиг. 285 показано изменение числа полюсов с 4 на 2 путем переключения катушек с последовательного соединения на параллельное. Соответствующее переключение с $2p=8$ на $2p=4$ показано для трехфаз-



Фиг. 285. Переключение полюсов с пересоединением катушек с последовательного соединения на параллельное.

ной обмотки на фиг. 286. Для однослойных обмоток изменение числа полюсов возможно лишь в отношении 2:1. Для двухслойных обмоток возможны вообще еще также соотношения 4:3 и 3:2.

Однослойные концентрические обмотки при меньшем числе полюсов дают кривые м. д. с. обмотки с резко выраженными гармоническими. Двухслойные, разрезные обмотки постоянного тока дают вполне удовлетворительное распределение м. д. с. в обоих случаях.

Практическое пересоединение обмоток производится по схеме фиг. 286а, где мы имеем переход с последовательного соединения на параллельное с одновременным переходом с одиночной звезды на двойную.

Фиг. 286б дает переключение с переходом с треугольника на двойную звезду. Последняя схема известна под названием схемы Даландера.

Схемы фиг. 286 а и в пригодны для переключения полюсов в отношении 1:2. Значения $2p_1=4$ и $2p_2=8$ на этих фигурах поставлены как примеры.

Рассмотрим закон изменения момента и мощности при переходе с одного числа полюсов на другое. Положим, что в схеме фиг. 286а напряжение, приложенное к двигателю, остается постоянным. При этом при переходе с $2p=8$ на $2p=4$ число последовательно соединенных витков на фазу уменьшается в два раза.

Так как

$$U = 4,44 \cdot f_1 k_{w8} \cdot \Phi_8 \cdot \omega_8 \cdot 10^{-8} = 4,44 f_1 \cdot k_{w4} \cdot \frac{\omega_8}{2} \Phi_4 \cdot 10^{-8}, \quad (573)$$

то

$$\frac{\Phi_4}{\Phi_8} = 2 \cdot \frac{k_{w8}}{k_{w4}}.$$

При $k_{w8} = 0,966$ и $k_{w4} = 0,68$, $\Phi_4 : \Phi_8 = 2,9$. (574)

В приведенном равенстве (573) Φ_8 и Φ_4 — магнитные потоки двигателя при $2p_1=8$ и $2p_2=4$, ω_8 и соответственно ω_4 числа витков на фазу, k_{w8} и k_{w4} — соответствующие коэффициенты обмоток.

Для того чтобы индукция в воздушном зазоре двигателя осталась постоянной и тем самым остались в нормальных пределах индукция в зубцах и потери в них, необходимо напряжение на зажимах машины снизить при $2p=4$ в 1,45 раза, т. е. в отношении 2,9:2. При этом $\Phi_4=2\Phi_8$.

Сила тока в сети при той же силе тока в проводниках при этом может быть увеличена вдвое. Следовательно, мощность при меньшем числе полюсов будет равна $2:1,45=1,38$ от мощности при большем числе полюсов. Вследствие возрастания скорости при $2p=4$ вдвое вращающий момент

$$M_4 = 0,7 M_8.$$

Необходимое снижение напряжения потребовало бы практически добавочного трансформатора. Так как при переключении обмотки напряжение сети остается неизменным, то двигатель рассчитывают при меньшем числе полюсов с тем, чтобы индукция в зазоре и зубцах при большем числе полюсов не превышала допустимой величины. При этом двигатель в обоих случаях может давать одинаковый момент, т. е. является двигателем постоянного момента.

В схеме Даландера при переключении при $U = \text{const}$ условия получаются более благоприятными. Здесь

$$U \approx 4,44 \cdot f_1 \cdot k_{w_8} \cdot w_8 \cdot \Phi_8 \cdot 10^{-8} = \sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f_1 \cdot k_{w_4} \cdot \frac{w_8}{2} \cdot \Phi_4 \cdot 10^{-8}. \quad (575)$$

При тех же коэффициентах обмотки получаем

$$\Phi_4 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{k_{w_8}}{k_{w_4}} \cdot \frac{w_8}{w_4} \cdot \Phi_8 = 1,65 \Phi_8. \quad (576)$$

При $2p=4$ индукция в воздухе таким образом будет на $\left(100 - \frac{164}{2}\right) = 18\%$ меньше. При прежней силе тока в обмотках вращающий момент при $2p=4$ получается около 0,6 момента при $2p=8$

$$M_4 = 0,6M_8.$$

В результате мы получаем двигатель примерно постоянной мощности. В зависимости от условий работы от четырехскоростных двигателей требуется для разных скоростей постоянный момент или постоянная мощность или некоторая комбинация этих двух вариантов. Соответствующим образом и конструируются двигатели.

Двигатели с переключением полюсов нашли исключительно широкое применение в металлорежущих станках в целях уменьшения числа механических передач. В последние годы двигатели с переключением полюсов стали широко применяться также в крановом оборудовании. В этом случае двигатель иногда имеет по две отдельных обмотки на статоре и роторе. Роторная обмотка низкой скорости — фазная и имеет три кольца; роторная обмотка высокой скорости — короткозамкнутая. Преимущество двух обмоток заключается в том, что переход с одного числа оборотов в минуту на другое достигается с меньшим числом контактов. Подобная система дает кранам преимущество в отношении электрического сверхсинхронного торможения. Крановые двигатели конструируются на $P = \text{const}$. Аналогичный тип двигателей с $M = \text{const}$ изготовлялся фирмой AEG для лифтов. Двигатели с переключением полюсов широко применяются также на нефтяных промыслах, где один и тот же двигатель выполняет различные функции при разных мощностях (подъем инструмента и труб,

опускаемых в скважины, откачка нефти). Так как эти двигатели нуждаются кроме ступенчатой в дополнительной регулировке скорости из-за специфических условий скважины и компаундирования, то двигатели для этой цели изготавливаются с кольцами. Регулировка дает возможность приспособлять такие двигатели к требованиям отдельных скважин и тем самым иметь в стандарте меньшее число типов двигателей.

Двигатели с переключением полюсов нашли также применение для насосов, вентиляторов, центрифуг, для привода гребного винта, в цементной промышленности, для элеваторов, для подъемной системы опрокидывателя вагонеток с углем, для перемешивания теста на хлебозаводах, для глажения в прачечных.

107. Регулирование скорости асинхронных двигателей изменением частоты

Поскольку синхронное (а следовательно, и близкое к нему номинальное) число оборотов в минуту асинхронного двигателя определяется выражением $n_0 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$, то самым простым способом

плавной регулировки асинхронного двигателя является изменение частоты питающего его тока. Некоторые особенности работы асинхронных двигателей при переменной частоте были рассмотрены в п. 82. В старых установках этот способ регулирования совершенно не применялся, так как электростанции, обслуживающие весьма большое количество приемников, могут естественно давать лишь ток постоянной частоты. Для получения переменной частоты для двигателя какого-либо привода необходим специальный преобразовательный агрегат.

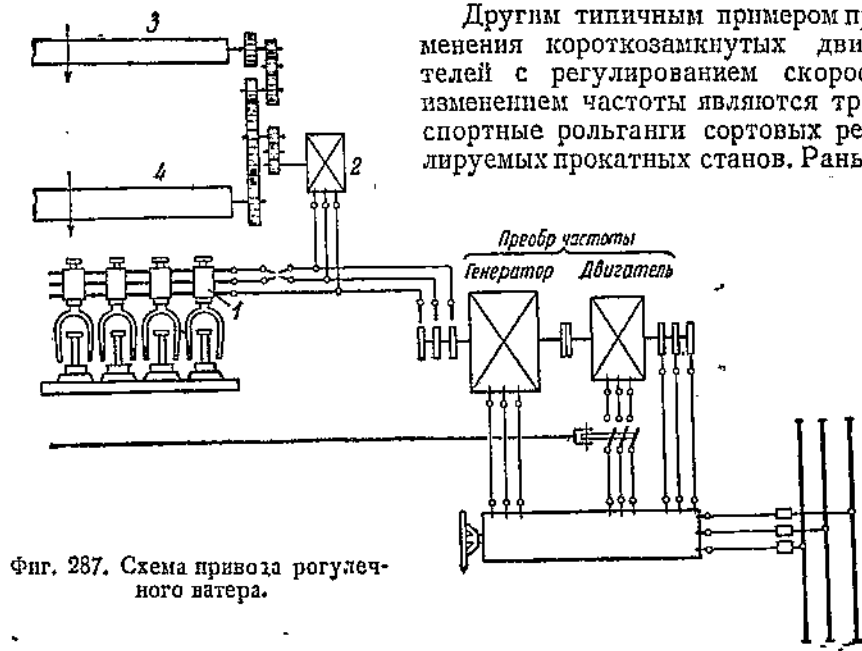
В отдельных случаях, как, например, в деревообделочной промышленности, нуждающейся по условиям обработки дерева в больших скоростях (в двигателях с $n=3000$ — максимальным числом оборотов в минуту, достижимым при $p=1$ и 50 Hz), применяются специальные преобразователи частоты и для отдельных рабочих машин.

Однако в промышленности встречаются случаи, когда отдельные идентичные по существу части одной и той же рабочей машины приводятся в движение отдельными регулируемыми двигателями. Регулировка этих двигателей должна вестись совершенно одновременно, а в таких случаях возможно их питание от одного общего преобразователя частоты. Примером могут служить рогачные ватера — прядильные машины текстильной промышленности. Раньше все рогачки приводились в движение от одного двигателя с помощью специальных передач. Теперь в некоторых новых конструкциях каждая рогачка имеет отдельный короткозамкнутый асинхронный двигатель с мощностью в 0,05—0,2 kW. Регулировка скорости осуществляется обычно с помощью асин-

хронного преобразователя частоты, состоящего из двигателя и асинхронной машины. Схема включения нескольких рогулек показана на фиг. 287.

На нем: 1 — двигатели рогулек; 2 — двигатель протягивания нити; 3 и 4 — втягивающий и вытягивающий цилиндры. Применение асинхронного двигателя в качестве приводного двигателя для асинхронного преобразователя частоты (генератора) оказывается возможным из-за небольших пределов регулировки.

Другим типичным примером применения короткозамкнутых двигателей с регулированием скорости изменением частоты являются транспортные рольганги сортовых регулируемых прокатных станков. Раньше

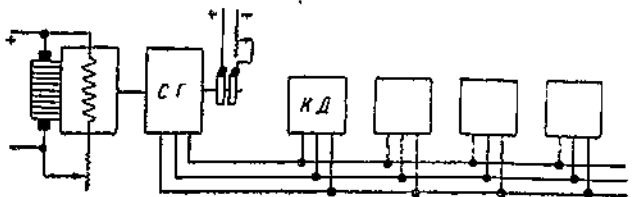


Фиг. 287. Схема привода рогулочного ватера.

транспортный рольганг, состоящий из большого количества роликов, приводился в движение одним двигателем через конические передачи. В настоящее время весьма часто каждый ролик нереверсивного (а иногда и реверсивного) рольганга приводится отдельным короткозамкнутым двигателем с мощностью от 0,3 до 0,7кВт. На Магнитогорском заводе установлено несколько сот таких двигателей. Подобный привод рольгангов дает большие эксплуатационные преимущества.

При старом приводе в случае порчи какой-либо одной конической передачи останавливался весь стан. Здесь же выход из строя одного двигателя не останавливает работы. Двигатель, вышедший из строя, работает без тока. Здесь вследствие наличия постоянного тока преобразование и регулирование частоты производятся с помощью двигателя постоянного тока и синхронного генератора фиг. 288. Регулировка частоты чаще всего ведется в пределах от 15 до 40 Hz.

При регулировке скорости короткозамкнутых двигателей в данном случае нам нужно добиваться, чтобы их магнитный поток оставался постоянным, тогда будет оставаться постоянным и намагничивающий ток. Это мы можем осуществить тем, что отно-



Фиг. 288. Схема питания многодвигательного привода рольгангов.

шение напряжения генератора U к частоте его f будем поддерживать постоянным. Если при регулировке скорости синхронного генератора его ток возбуждения мы будем оставлять постоянным, то индуктированная в нем э. д. с. будет меняться прямо пропорционально частоте, т. е. мы получим постоянство магнитного потока в асинхронных двигателях при всех скоростях. Для повышения начального пускового момента двигателей обычно при пуске производится форсировка возбуждения генератора.

Пуск системы начинается с включения двигателей на генератор, когда последний развил частоту примерно в 15 Hz. После включения все двигатели начинают вращаться с малой скоростью. Повышая частоту синхронного генератора изменением скорости приводящего его шунтового двигателя, мы можем довести число оборотов в минуту асинхронных двигателей до необходимых пределов. Завод «Электросила» изготовляет для этой цели двигатели типа АЗР (асинхронные, закрытые, рольганговые) с данными.

1) 0,410/0,183 kW, 296/148 V, 737/338 об/мин, 39/19,5 Hz,

2) 0,736/0,374 kW, 285/125 V, 715/290 об/мин, 37/16,5 Hz,

3) 1,35/0,62 kW, 322/154 V, 880/405 об/мин, 46/22 Hz.

Нужно отметить, что американская практика последнего времени [Л. 182] при аналогичном многодвигательном приводе роликов в подъемных столах и охлаждаемых помостах стала применять двигатели постоянного тока в целях уменьшения капитальных затрат и потерь при лишнем преобразовании энергии.

108. Некоторые специальные типы асинхронных двигателей со ступенчатой регулировкой, двигатели повышенной частоты, дуговой статор

Отдельные механизмы некоторых отраслей промышленности предъявляют требования на двигатели очень высоких скоростей иногда наряду с требованиями регулировки скорости. Сюда относятся прежде всего деревообрабатывающая промышленность,

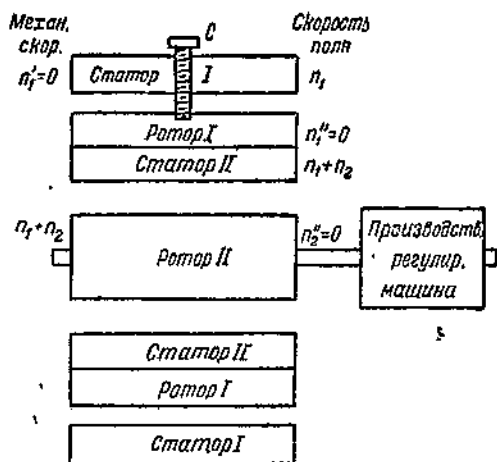
затем центрифуги, ряд инструментов, ультрацентрифуги и колпачковые крутильные веревки текстильной промышленности. Высокоскоростные двигатели минимальных габаритов со скоростью до 30 000 об/мин требуются также для установки в аэродинамических трубах. Такие высокие скорости в основном достигаются применением асинхронных двигателей на высокую частоту. Так, аэродинамические двигатели мощностью от 3,5—75 kW питаются током частоты 500 Hz. Для ультрацентрифуг были запроектированы двигатели со скоростью в 100 000 об/мин при частоте 3 000 Hz. Высокая частота также применяется в деревообрабатывающей промышленности, где для получения скоростей резания в 25—100 м/сек инструментальные головки должны делать от 3 000 до 24 000 об/мин.

Высокие и повышенные частоты получаются или от специальных генераторов высокой частоты или от особых преобразователей частоты.

Некоторые механические трудности конструирования высокочастотных двигателей повели к тому, что для деревообрабатывающей промышленности были созданы специальные двигатели высокой скорости с двумя и тремя роторами [Л. 183—184].

Принципиальная идея этого двигателя представлена на фиг. 289. С ротором первого двигателя жестко связан статор второго двигателя, имеющего кольца для подвода тока. Таким образом в этом двигателе могут совершенно независимо на особых подшипниках вращаться: 1) статор второго двигателя с ротором первого и 2) ротор второго двигателя. Ротеры обоих двигателей чаще делают короткозамкнутыми, однако встречаются и фазные. Если число полюсов двигателя II равно 2, то при питании его одним током частоты 50 Hz исполнительный механизм идет со скоростью 3 000 об/мин. При этом статор двигателя II должен быть закреплен стопором (С), ибо вращающий момент, создаваемый магнитным полем, действует в одинаковой мере как на статор, так и на ротор двигателя II.

Ввиду того, что нагрузка для ротора двигателя II (момент исполнительного механизма) представляет большее сопротивление, чем трение подшипников статора, то без закрепления статора II в большинстве случаев вращался бы статор второго двигателя. Если бы ротор этого двигателя и вращался, то лишь с малой



Фиг. 289. Специальный тип регулируемого двигателя для деревообрабатывающей промышленности.

скоростью. Сумма скоростей статора и ротора должна быть близка к скорости вращающего магнитного поля.

Итак, при включении одного второго двигателя связанная с двигателем рабочая машина идет с числом оборотов в минуту (при $p=1$), близким к 3000. Если статор II освободить и дать вращающееся магнитное поле также в статор первого двигателя, то его ротор при $p=1$ пойдет с $n=3000$ об/мин. Статор второго двигателя, получая сам вращающееся магнитное поле со скоростью $n=3000$ об/мин, будет переноситься в пространстве ротором первого двигателя со скоростью $n=3000$ об/мин. Следовательно, поле статора второго двигателя пойдет в пространстве со скоростью $3000+3000=6000$ об/мин. С той же скоростью примерно пойдет и ротор двигателя II. Если на втором двигателе устроить переключение числа полюсов с $2p=2$ на $2p=4$, то можно получить числа оборотов в минуту: 1500, 3000, 4500 и 6000. Понятно, что в действительной конструкции роторная обмотка двигателя I и статорная обмотка двигателя II помещаются на наружной и внутренней поверхностях одного и того же цилиндра.

Фирма Oerlikon выполнила для целей тяги такие двигатели с двумя статорными обмотками с переключением полюсов на 18 скоростей.

Кроме приведенной конструкции двигателя с концентрическим расположением роторов иногда применяются так называемые двигатели тандем, в которых для уменьшения наружного диаметра первый и второй двигатель раздвинуты один относительно другого.

На продолжении вала двигателя I насажен полый цилиндр, к которому и прикреплен статор двигателя II. Ротор последнего естественно находится внутри этого статора. Относительная конструктивная сложность двухроторных асинхронных двигателей повела к тому, что на практике и в частности в деревообрабатывающей промышленности им предпочитают обыкновенный высокочастотный асинхронный двигатель.

Целесообразно здесь же рассмотреть попытки получения от асинхронного двигателя чисел оборотов в минуту, не соответствующих нормальным синхронным при 50 Hz при достижении полного объединения двигателя с исполнительным механизмом. Идея этого привода, который может быть назван дуговым статором, исходит от Тромбетты (1924 г. патент № 227845). Однако за границей этот тип привода совершенно не получил распространения, все ограничилось практически патентом. Эта идея исключительно энергично у нас в течение ряда лет развивалась инж. Фридкиным сначала применительно к приводу кардочесальной машины текстильной промышленности, а затем к приводу угольной мельницы на электрических станциях.

Дуговой статор принципиально дает большие возможности для тихоходных приводов. При дуговом статоре асинхронной машины мы можем получать любые синхронные скорости.

В самом деле, в нормальном асинхронном двигателе

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad \text{а} \quad n_0 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}.$$

Так как

$$\dot{p} = \frac{\pi D}{2\tau}, \quad \text{то} \quad n_0 = \frac{f_1 \cdot 60}{\pi D} \cdot 2\tau = \frac{120\tau \cdot f_1}{\pi D}.$$

Из этого равенства видно, что синхронное число оборотов в минуту асинхронного двигателя при фиксированной частоте (50 Hz) имеет строго определенные значения (3000, 1500, 750, 600, 500, 375 и т. д.). Если же мы используем под обмотку не всю окружность статора, а лишь часть ее — дугу фиг. 12, то $\frac{\pi D}{\tau} = 2p$ может быть уже не целым четным числом, а дробным.

Следовательно, двигатель может иметь значения скорости, не только определяемые формулой $n_0 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$ при p целом, а и любые промежуточные. Таковое ценное принципиальное свойство дугового статора, дающее возможность избегать промежуточных передач, неизбежных иногда в силу строго фиксированных синхронных скоростей асинхронного двигателя и в силу рациональности определенных скоростей для исполнительных механизмов.

При применении этого дугового статора к тем или иным органам рабочей машины необходимо учитывать, что осуществление дугового статора возможно лишь при определенных окружных скоростях.

Так как

$$v = \frac{\pi D p}{60} \quad \text{и} \quad \tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad \text{а} \quad n_0 = \frac{f_1 \cdot 60}{p},$$

то

$$v = \frac{\pi D}{60} \cdot \frac{f_1 \cdot 60}{p} = \frac{\pi D f_1}{p}.$$

Следовательно, $v = 2\tau f$ или при $f = 50$ Hz $v = 100 \cdot \tau$.

Таким образом окружная скорость ротора v в метрах в секунду должна быть равна полюсному делению в сантиметрах. Так как полюсное деление в машинах средней мощности по условиям конструирования не может быть нормально меньше 12 см и лишь в редких случаях может быть доведено до 6 см, то применение дугового статора возможно лишь к таким частям рабочих машин, окружные скорости которых не менее 6 м/сек. При этом очевидно, что между диаметром вращающейся части и числом оборотов в минуту получаем связь $D = \frac{60v}{\pi n}$.

То, что весьма заманчивая на первый взгляд идея дугового статора практического применения за границей до сих пор не нашла, объясняется, повидимому, рядом причин. Некоторую роль

в этом отношении, несомненно, сыграло появление редукторного двигателя. Основные же причины этого кроются, повидимому, в худших свойствах дугового статора как электрической машины по сравнению с нормальным асинхронным двигателем, достигшим высокой степени совершенства. Достаточно указать хотя бы на слабое использование меди ротора, ибо проводники его находятся под током лишь часть времени. Дуговой статор должен иметь несколько сниженный к. п. д. за счет обрыва вращающегося магнитного поля на краях дугового статора. При этом обрыве получаются значительные добавочные потери. Нужно сказать, что специфика электромагнитных процессов в дуговом статоре до сих пор окончательно еще не изучена. Повидимому, те же причины исключили до сего времени возможность применения в рабочих машинах прямолинейного бегущего поля.

У нас в СССР инж. П. А. Фридкин разработал несколько конструкций электрокардной машины для текстильной промышленности. В электрокардной машине ротором является барабан машины, на небольшой длине которого по всей окружности уложены медные стержни обмотки ротора (беличья клетка) (фиг. 12).

Дуговой статор в конструкции П. А. Фридкина так прост, что может легко вставляться в машину и выниматься из нее. К настоящему времени изготовлено несколько таких машин. По идее П. А. Фридкина заводом «Электросила» им. С. М. Кирова изготовлен дуговой статор для угольной мельницы мощностью 192 kW, 28 об/мин. Два таких дуговых статора, суммарной мощностью 400 kW, 28 об/мин, 3000 V установлены для пробной эксплуатации на шаровой углеразмольной мельнице Сталинской ТЭЦ в Москве.

Вместо привода мельницы от дугового статора можно было бы применить привод от синхронного двигателя с редукторной передачей. Главным преимуществом привода с дуговым статором перед приводом от синхронного двигателя является отпадение исключительно громоздкой и очень тяжелой зубчатой передачи, венцом охватывающей большой диаметр мельницы. Привод от дугового статора дает в этом случае большую экономию в материале. Недостатком дугового статора для малой скорости, как и всякой тихоходной асинхронной машины, является очень низкий cos φ. Для его улучшения приходится применять статические конденсаторы. Итоги ближайшей эксплуатации установленного привода смогут дать выводы о дальнейшем применении дугового статора в аналогичных механизмах, как-то: цементные мельницы, вращающиеся обжигательные печи, рудодробильные мельницы и т. п.

109. Краткие соображения о пределах регулирования и пределах применимости коллекторных двигателей переменного тока

Механические свойства применяемых в промышленности коллекторных двигателей переменного тока кратко были рассмотрены в пп. 43 и 44. Как там уже отмечено, в промышленности исполь-

зуются лишь следующие типы этих двигателей: а) репульсионные двигатели типа Гутмана-Латура и Дери; б) трехфазные шунтовые двигатели: α (с возбуждением со статора), β (с возбуждением с ротора — типа Рихтера — Шраге); в) трехфазные последовательные двигатели с одним и двумя комплектами щеток.

Регулировка скорости всех этих двигателей производится сдвигом щеток. Нормальными пределами регулировки различных типов коллекторных двигателей при постоянном моменте обычно следует считать для: а) репульсионного двигателя от 50 до 110—120% синхронной скорости; б) трехфазного последовательного двигателя от 50 до 130%; в) трехфазного шунтового от 50 до 150%.

Верхняя достижимая скорость ограничена условиями коммутации этих двигателей, начинающих искрить при превышении синхронной скорости иногда всего на 15—30%. Нижний предел регулировки скорости может быть принципиально доведен до 5%. Однако большие пределы регулировки обуславливают большие размеры коллектора и кроме того имеет место значительное ухудшение вентиляции (при низших скоростях).

Поэтому в нормальных коллекторных машинах регулировка вниз ограничивается обычно 50% синхронной скорости. Нормальный заграничный стандартный коллекторный двигатель в случае регулировки при постоянном моменте может работать при числе оборотов в минуту, равном 50% от M_N в течение часа. Только в случае квадратичного изменения момента нагрузки минимальное допустимое в течение часа число оборотов в минуту вследствие уменьшения тока длительно может снижаться до 5%. Максимум допустимой скорости при вентиляторном моменте снижается в свою очередь до 115%.

Репульсионные однофазные коллекторные двигатели могут конструироваться на любое напряжение и за границей строятся для мощности до 75 kW при 50 Hz. В трехфазных шунтовых двигателях, питаемых через ротор, напряжение питания ограничено 500 V. Напряжение серийных двигателей из-за коллектора ограничивается при прямом включении 150 V. При больших напряжениях их приходится включать через трансформатор.

Стандартные шунтовые трехфазные двигатели строятся с регулировкой 1:3 для мощностей до 150 kW, серийные двигатели с нормальной регулировкой 1:2,4—до таких же мощностей. В США на двух прокатных станах работают два двигателя Шраге: один мощностью 400 kW с регулировкой 1:3, другой мощностью 370 kW с регулировкой 1:2,4. Имеются отдельные установки с трехфазными серийными двигателями в 600 kW.

Фирма SSW изготавливает серийные двигатели до 500 kW, но такие большие мощности в практических установках (не касаясь каскадных) являются не частыми.

Наибольшее распространение коллекторные двигатели к сегодняшнему дню нашли в Германии, Швейцарии, Англии и Франции. Наиболее широко применяется, пожалуй, репульсионный двигатель,

усовершенствованный фирмой BBC и SSW. Он используется в подъемно-транспортных устройствах, на кольцевых ватерах текстильной промышленности, на металлорежущих станках, регулируемых поршневых насосах и компрессорах, работающих при постоянном моменте.

Трехфазная последовательная машина нашла применение в кольцевых ватерах, откуда она вытеснила в Германии репульсионный, на кранах и подъемниках, в вспомогательных механизмах электрических станций (дымососы, вентиляторы, дутье, центробежные насосы).

Трехфазный шунтовой коллекторный двигатель используется за границей в металлообрабатывающих станках, в резиновой промышленности для каландров, для кольцевых ватеров и отделочных машинах текстильной промышленности. Он нашел также применение при одно- и многодвигательном приводе бумагоделательных машин, для накатных и разрезных станков бумажной промышленности, типографских машин, каландров разных отраслей промышленности, насосных станций, эксгауэтеров и шахтных подъемников.

Некоторая громоздкость коллекторных двигателей переменного тока и их высокая стоимость, а частично и большая сложность протекающих в них процессов, задержала применение этих двигателей у нас в СССР. По весу коллекторный двигатель переменного тока значительно превосходит двигатель постоянного тока. Так, коллекторный двигатель с регулируемой скоростью 1:3 и мощностью при наибольшем числе оборотов в минуту в 12 kW весит в два раза тяжелее соответствующего двигателя постоянного тока и в три раза тяжелее нерегулируемого короткозамкнутого двигателя [Л. 185]. Таким образом, то преимущество, которое получается при применении коллекторных двигателей, в отношении отсутствия необходимости в добавочном преобразовании энергии в ряде случаев может быть компенсировано их большим весом. Вопрос о технико-экономических пределах применимости этих двигателей должен быть еще дополнительно изучен и частично будет нами освещен далее в главе о выборе рода тока.

В настоящее время завод «Электросила» разработал серию коллекторных шестиполусных промышленных электродвигателей типа КП, из восьми типов [Л. 185] для привода механизмов полиграфической, бумажной и текстильной промышленности с проектными мощностями при наибольшей скорости вращения 4, 6, 8, 12, 17, 22, 30, 40 kW с пределами регулирования при постоянном вращающем моменте от 500 до 1400 об/мин. Управление щетками этих двигателей дистанционное посредством специального короткозамкнутого асинхронного серводвигателя, расположенного на верхней части щита со стороны коллектора. Передача от серводвигателя к щеточным траверзам состоит из червяка и стальных тросиков. Предельные положения траверз фиксированы конечными выключателями.

Коэффициент полезного действия двигателей этой серии при скоростях от 950 до 1 400 об/мин лежит в пределах 75—85 %, при 500 об/мин 65—75 %. Меньшие цифры относятся к меньшим мощностям.

Кроме того заводом «Электросила» изготовлены двигатели Шраге типа ШД мощностью 92/61/12,5 kW, 750/500/200 об/мин 220 V, предназначенные для привода роторной машины новой типологии «Известия». Коэффициент полезного действия этого двигателя в трех указанных режимах получается равным 84/83/63 %, соответственно коэффициент мощности 0,98/0,8/0,65.

Там же подготовляется выпуск коллекторных двигателей типа КТ мощностью 8,5/5,7/3,0 kW, 1 400/940/500 об/мин 500 V для привода кольцевых ватеров текстильной промышленности.

Из изложенного видно, что нормальные коллекторные двигатели переменного тока дают практически те же пределы регулировки, что и шунтовые двигатели постоянного тока, т. е. 1:3. Выбор между теми и другими должен основываться на экономических соображениях. При пиковых нагрузках коллекторные двигатели имеют существенный минус в отношении более плохой коммутации. Если бы вес и стоимость коллекторных двигателей были одинаковы с шунтовыми, то экономические преимущества были бы на стороне первых, ибо при имеющем место распределении энергии переменным током применение двигателей постоянного тока требует преобразователей — двигатель-генераторов, ртутных выпрямителей и т. п. При отдельных двигателях, устанавливаемых на отдельном механизме, экономическое преимущество практически обычно будет на стороне коллекторного двигателя. При большом числе регулируемых двигателей экономический перевес во многих случаях может быть на стороне двигателей постоянного тока, так как стоимость преобразователя с увеличением числа питаемых двигателей ложится меньшим процентом на каждый двигатель. Поэтому решение вопроса о применении на одной установке большого числа коллекторных двигателей требует на наш взгляд обязательного сравнения их с двигателями постоянного тока, вообще более простыми по обслуживанию и по ремонту.

Иногда говорят, что коллекторные двигатели стоят дорого потому, что они изготавливаются в меньших количествах по сравнению с двигателями постоянного тока. Частично это так. Однако специфика работы коллектора при переменном токе неизбежно обуславливает их больший вес, а следовательно, и большую стоимость по сравнению с двигателем постоянного тока.

Несколько сложнее обстоит вопрос о выборе коллекторных двигателей для очень широких пределов регулирования скорости 1:6, 1:10 и выше, которые в наших случаях практики пока нормально удовлетворялись почти исключительно системой Леонарда.

За последние годы за границей, частично и у нас, созданы коллекторные двигатели с более широкими пределами регулировки скорости. Один из таких двигателей с питанием со статора с использованием фазорегулятора был описан в п. 43. Одна

английская фирма изготавливает двигатели для бумагоделательных машин мощностью 150—200 kW с пределами регулирования 1:6. Изготовлены и работают за границей также шунтовые двигатели мощностью 45/8 kW 1130/207 об/мин с пределами регулирования 1:5,5 и серийные двигатели с охлаждающим вентилятором мощностью 67/5,6 kW 375/30 об/мин с пределами регулирования 12,5:1. Построены также двигатели для ротационной машины с мощностью при наибольшей скорости 60 kW с пределами регулирования 1150/36 об/мин 1:40 $M = \text{const}$ [Л. 186], правда, с использованием добавочного переключающегося механического редуктора. Завод «Электросила» также построил двигатель типа KB 20/0,1 kW, 2000/100 об/мин с пределами регулировки скорости 1:20 для привода плосковязальных чулочных машин. Интересно, что этот двигатель весит около 170 kg при весе короткозамкнутого асинхронного двигателя такой же мощности всего в 29 kg.

Таким образом при малых и средних мощностях могут быть построены коллекторные двигатели с пределами регулирования 1:10 при постоянном моменте. В этом отношении шунтовой коллекторный двигатель эквивалентен системе Леонарда при регулировке скорости двигателя напряжением генератора. В отношении устойчивости работы при низких скоростях коллекторные двигатели имеют некоторое преимущество перед системой Леонарда без вольтодобавочных машин.

В тех случаях, когда речь идет об одном приводном двигателе, коллекторные двигатели иногда могут с успехом конкурировать с системой Леонарда. При большем количестве двигателей начинает сказываться более высокая стоимость коллекторных двигателей по сравнению с обыкновенными двигателями постоянного тока. Это является одной из основных причин, почему наша промышленность, не имевшая опыта с коллекторными двигателями, весьма осторожно подходит к применению последних. Требуется еще дополнительное экономическое изучение вопроса для того, чтобы можно было сделать выводы о пределах применимости коллекторных двигателей в наших условиях. Мы имеем все возможности выбирать наиболее правильные технико-экономические решения, и вопрос должен быть предварительно взвешен надлежащим образом. Простое копирование решений капиталистической техники отдельных стран может привести к неправильным решениям.

Установки, для которых можно говорить об использовании коллекторных двигателей переменного тока, были перечислены выше. Некоторые соображения о применимости коллекторных двигателей будут даны еще ниже в главе о выборе рода тока.

110. Области применения каскадных установок асинхронных машин с коллекторными, принцип их работы и главнейшие типы

В мощных промышленных установках, таких, как некоторые нереверсивные прокатные станы, крупные воздуходувки, шахтные вентиляторы, центробежные насосы, требуется в ряде случаев

плавная регулировка скорости в сравнительно широких пределах. Трехфазные коллекторные двигатели изготавливаются на ограниченную мощность, практически не выше 300—400 кВт. Да и при этих мощностях на ударной нагрузке (прокатные станы) они работать не могут. Опыт применения фирмой GEC на прокатных станах в США двух указанных в предыдущем параграфе двигателей Шраге не дал особенно хороших результатов. Синхронные двигатели в регулируемых установках неприменимы. Регулировка скорости асинхронных двигателей переключением полюсов непригодна из-за ступенчатости, регулировка же частотой практически при таких мощностях неосуществима. Регулировка скорости асинхронного двигателя посредством добавочного сопротивления в цепи ротора оказывается невыгодной, так как потери в реостатах становятся чрезвычайно большими, а стоимость потерянной в них энергии оказывается весьма значительной. Точно так же становится высокой и стоимость тех регулирующих реостатов, которые должны быть введены в цепь ротора. Поэтому, если речь идет о плавной регулировке скорости асинхронного двигателя с мощностью в несколько сот киловатт и выше, оказывается экономичным применение каскадных установок.

В этом случае в цепь ротора асинхронного двигателя вводится добавочная коллекторная машина, с помощью которой можно регулировать скорость двигателя так же, как и при добавочном сопротивлении. Однако при каскаде энергия скольжения не пропадает бесполезно в этом сопротивлении, а возвращается добавочной машиной в качестве полезной энергии или обратно в сеть или на вал асинхронного двигателя.

Если речь идет об асинхронном двигателе с мощностью, не превышающей несколько сот киловатт (200—300), то регулировка сопротивлением обычно оказывается экономичнее каскадной установки. Расходы по амортизации добавочной машины, включаемой в ротор асинхронного двигателя, вместе со стоимостью потерь в этой машине оказывается выше расходов по амортизации регулировочного реостата и расходов на потерянную в ней энергию. Если речь идет об установке большей мощности, то суммарная эксплуатационная стоимость добавочных машин оказывается меньше стоимости потерь в реостатах и амортизационной стоимости самих реостатов. Причины этого кроются в том, что при повышении мощности электрических машин (в данном случае добавочных) стоимость их на 1 кВт падает, уменьшаются габариты и площадь, приходящаяся на 1 кВт, а к. п. д. их повышается.

Простейшая идея регулировки скорости асинхронного двигателя с помощью каскадного включения с добавочными машинами может быть уяснена из следующего. В пределах номинальной нагрузки при заданном моменте нагрузки на валу асинхронного двигателя M и при постоянном приложенном к двигателю напряжении U магнитный поток двигателя постоянен. В таком случае

$$M = \text{const} = c \cdot \Phi_s \cdot I_r = c' \cdot I_r = c' \cdot \frac{E_2}{z_2} = c'' \cdot \frac{c'' \Phi_s (n_0 - n_r)}{z_2}$$

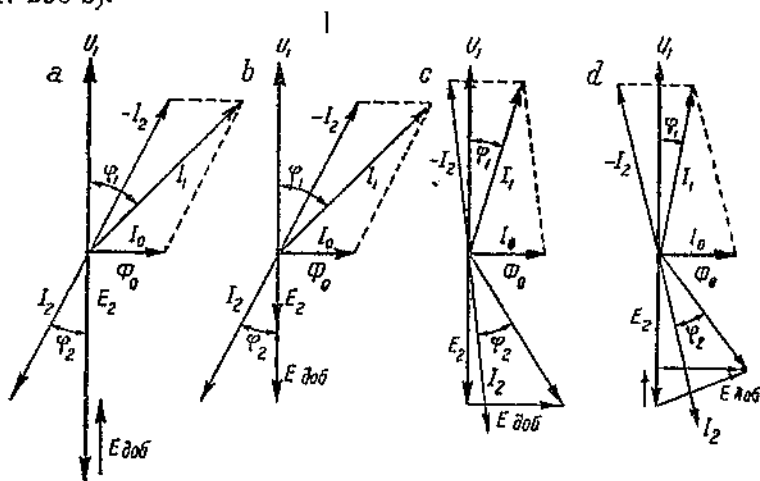
Пренебрегая для упрощения изменением z_2 за счет изменения частоты ротора $f_2 = f_1 \cdot s$, т. е. за счет изменения реактивного сопротивления, мы получим

$$M = \text{const} = c''' \cdot \Phi_s (n_0 - n_r) = c_1 \cdot s.$$

Полезный момент двигателя оказывается пропорциональным скольжению. При введении в ротор добавочной э. д. с. $E_{доб}$ под некоторым углом к E_2 , мы получим

$$M = \text{const} = c''_1 [c'' \cdot \Phi_s (n_0 - n_r) \pm E_{доб}].$$

Очевидно, что всякое введение $E_{доб}$ при $\Phi_s = \text{const}$ и $n_0 = \text{const}$ будет сказываться непосредственно на n_r . Если $E_{доб}$ будет направлено одинаково с E_2 , то скорость двигателя будет повышаться (фиг. 290 б).



Фиг. 290. Роль введения добавочной э. д. с. в цепь ротора асинхронного двигателя.

Если $E_{доб}$ будет направлена навстречу E_2 , скорость будет снижаться (фиг. 290а). В том случае, когда добавочная э. д. с., будучи направлена согласно э. д. с. ротора при ниже синхронной скорости, достаточно велика, асинхронный двигатель переходит на работу выше синхронной скорости, продолжая работать в режиме двигателя. Если $E_{доб}$ будет направлена под прямым углом к E_2 , мы получим лишь улучшение $\cos \varphi$ (фиг. 290с), т. е. работу компенсатором фаз. Если $E_{доб}$ будет направлена к E_2 под углом α , отличным от $0, 90^\circ$ и 180° , то мы будем иметь две составляющие $E_{доб}$, из которых одна будет влиять на скорость, другая — на $\cos \varphi$ асинхронного двигателя (фиг. 290д).

В действительности явление усложняется благодаря изменению реактивного сопротивления ротора при изменении его скорости и благодаря тому, что добавочная машина сама обладает активным и реактивным сопротивлением. Однако идея регулировки остается той же самой.

Заметим еще, что если $E_{доб}$ направлена навстречу E_2 , соответствующей скорости асинхронного двигателя ниже синхронной, и $E_2 > E_{доб}$, то добавочная машина получает ток от асинхронного двигателя и работает как двигатель. При направлении $E_{доб}$ согласно E_2 при скорости асинхронного двигателя ниже синхронной, при $E_{доб} > E_2$ и обратных знаках $E_{доб}$ и E_2 , т. е. при скорости асинхронного двигателя выше синхронной, добавочная машина работает как генератор. Асинхронная машина в этом случае и при скорости выше синхронной остается работать в режиме двигателя.

Рассмотрим эти особенности несколько подробнее, так как понимание их представляет известные трудности. Нормально асинхронный двигатель может работать ниже синхронной скорости лишь двигателем, выше синхронной скорости — лишь генератором. В каскадах мы имеем отличные условия работы асинхронного двигателя. Здесь он может работать генератором и двигателем при скорости как выше, так и ниже синхронной. Причины этого лучше всего уясняются, если взять идеальный двигатель без потерь. В такой машине в случае отсутствия нагрузки при любой скорости (безразлично выше или ниже синхронизма) э. д. с. ротора $E_2 = E_{доб}$ и ток равен нулю.

Если к двигателю прикладывается момент нагрузки, то двигатель сможет его преодолевать лишь за счет снижения скорости. При скорости ниже синхронной происходит увеличение E_2 за счет снижения скорости двигателя — $E_2 > E_{доб}$. Машина работает в режиме двигателя. При скорости выше синхронной происходит уменьшение E_2 за счет снижения скорости двигателя. При этом $E_{доб} > E_2$, но машина остается работать в режиме двигателя.

Если же в машине посредством использования маховых масс или отрицательного момента нагрузки скорость будет повышена относительно скорости, соответствующей условию $E_2 = E_{доб}$, то знаки результирующей э. д. с. в роторе изменятся по сравнению с условиями, рассмотренными выше. Ниже синхронизма $E_{доб} < E_2$, E_2 упадет при увеличении скорости. Выше синхронизма $E_2 < E_{доб}$, E_2 увеличится при повышении скорости. Изменение знака результирующей э. д. с. и вызовет переход машины в генераторный режим.

Раздел между генераторным и двигательным режимом имеет место при такой скорости, при которой соблюдается равенство $E_2 = E_{доб}$ независимо от того, идет ли асинхронная машина выше

или ниже синхронизма. Таким образом принципиально рекуперация энергии в каскаде возможна при любой скорости асинхронного двигателя как выше, так и ниже синхронной, если соответствующие условия даются нагрузкой.

Предыдущее уясняет возможность перехода асинхронного двигателя в генераторный режим при выше и ниже синхронной скорости. Остается еще рассмотреть, каким образом достигается в каскаде работа двигателя выше синхронной скорости с точки зрения вращения магнитных полей. Под влиянием основного магнитного вращающегося поля ротор может идти лишь со скоростью ниже синхронной. Для существования момента асинхронного двигателя необходимо выполнение условия взаимной неподвижности потоков статора и ротора. Оно осуществляется тем, что скорость магнитного потока ротора, складывающаяся из скорости его вращающегося поля, $n_2 = \frac{f_2 \cdot 60}{p}$ и механической скорости ротора n_r ,

автоматически всегда равняется скорости вращающегося магнитного поля статора $n_0 = n_2 + n_r$. При этом $n_r < n_0$.

Если мы в ротор будем от постороннего источника подводить ток частоты $f_1 \cdot s$ таким образом, чтобы поле от него (n_2) вращалось в сторону, обратную вращению поля статора (n_0), то ротор должен идти со скоростью выше синхронной. В этом случае

$$n_0 = n_r - n_2'$$

Такое повышение скорости асинхронного двигателя нормально может быть получено лишь плавным доведением частоты тока ротора до нуля и далее плавным повышением частоты тока ротора.

Мощность, полученная асинхронным двигателем и отданная им на вал, будет равна

$$P_2 = M \cdot \omega = c \cdot M \cdot n_r$$

Из сети же двигатель может получить лишь мощность

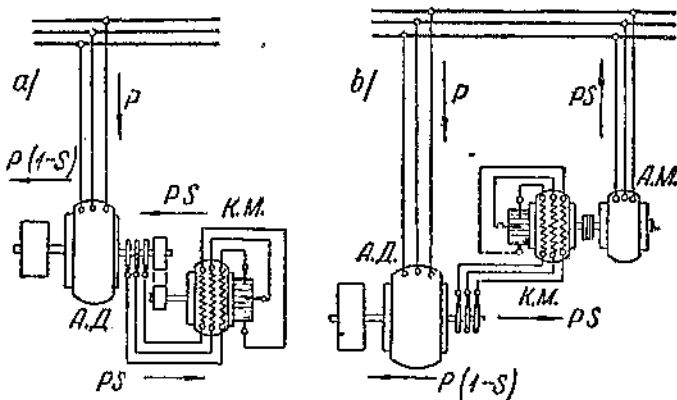
$$P_1 = M \cdot \omega_0 = c \cdot M \cdot n_0$$

Очевидно, что разность $P' = c \cdot M(n_r - n_0) = c \cdot M \cdot n_2$ должна доставляться тем источником, от которого вводится добавочная э. д. с.

Все каскадные установки могут быть разделены на две основных категории: установки постоянной мощности и установки постоянного момента в соответствии с требованиями производственных машин. Основное отличие установок постоянного момента от установок постоянной мощности заключается в следующем.

Установки постоянной мощности характеризуются тем, что какая-то из машин, включенных в каскад с главным асинхронным двигателем сочленяется механически с валом этого двигателя

(фиг. 291а). В зависимости от типа каскадной установки это будет та или иная коллекторная машина. Механическое сочленение может быть выполнено как при помощи муфты, так и при помощи зубчатой передачи или ремня. Таким образом для установки постоянной мощности характерной является механическая связь главного асинхронного двигателя с машиной, введенной в каскад (в ротор асинхронного двигателя). В случае установки постоянного момента такой механической связи не имеем.



Фиг. 291. Принципиальные схемы каскада с трехфазным последовательным коллекторным двигателем при постоянной мощности и постоянном моменте.

Схема установки постоянного момента представлена на фиг. 291b. Вместо одной добавочной машины (минимум) в случае установки постоянной мощности в установках постоянного момента обязательно применение (по крайней мере) двух машин, механически не связанных с главным асинхронным двигателем.

Одна из этих машин — коллекторная постоянного или переменного тока. При постоянном токе вводится промежуточное звено для преобразования энергии — однопорный преобразователь. Вторая машина обычно асинхронная, в отдельных случаях — синхронная.

Рассмотрим, каким образом распределяются при разных скоростях мощности асинхронного двигателя и рабочей машины между отдельными агрегатами, входящими в состав каскадной установки.

На всем интервале регулировки скорости асинхронного двигателя можно от него с точки зрения его нагрева получить длительно одну и ту же мощность \underline{P}_N .

В статор асинхронного двигателя при любой скорости может длительно поступать из сети мощность

$$P_N = M_N \cdot \omega_0,$$

где M_N — номинальный момент. Эту мощность можно выразить таким образом:

$$M_N \cdot \omega_0 = M_N(\omega_0 - \omega_r) + M_N \cdot \omega_r = P_N \cdot s + P_N(1 - s).$$

Величина

$$M_N \cdot \omega_r = P_N(1 - s)$$

представляет всегда полезную мощность асинхронного двигателя или ту мощность, которую асинхронный двигатель непосредственно отдает рабочей машине. Величина же

$$M_N(\omega_0 - \omega_r) = P_N \cdot s,$$

представляющая в общем случае потери в цепи ротора, в случае каскадной установки характеризует ту мощность, которая передается асинхронным двигателем с колец машине, включенной с ним в каскад.

Обратимся к диаграмме, которая была дана при рассмотрении регулировки скорости асинхронного двигателя сопротивлением в цепи ротора (фиг. 283). Мы там говорили, что верхняя часть диаграммы представляет полезную мощность или величину $P(1-s)$, нижняя же часть характеризует потери в реостате или величину $P \cdot s$. Преимущество каскадной установки перед регулировкой скорости сопротивлением и заключается именно в том, что в ней энергия скольжения асинхронного двигателя P_s не пропадает бесполезно в реостате, а возвращается машинами, включенными в каскад, или на вал рабочей машины в случае установки при постоянной мощности (фиг. 291a) или обратно в сеть — в случае установки при постоянном моменте (фиг. 291b).

Для упрощения при дальнейшем рассмотрении баланса мощностей мы будем пренебрегать потерями в машинах. Обмен энергией в каскадах представлен на той же фиг. 291. Рассмотрим сначала, как распределяется мощность, поступающая к асинхронному двигателю в установке постоянной мощности. С точки зрения нагрева асинхронного двигателя на всем пределе регулировки мы можем подводить к нему одну и ту же мощность P_N .

Эта мощность асинхронным двигателем делится на две части: мощность $P_N(1-s) = M_N \cdot \omega_r$ в форме механической мощности передается асинхронным двигателем непосредственно рабочей машине. Остающаяся часть мощности $P_N \cdot s = M_N(\omega_0 - \omega_r)$ в форме электрической мощности передается с колец асинхронного двигателя той коллекторной машине, которая включена в каскад и сидит на одном валу с асинхронным двигателем. Машина, включенная в каскад, получая электрическую мощность $P_N \cdot s$ и работая в качестве двигателя, перерабатывает эту мощность в механическую.

Так как машина сидит на том же валу, что и асинхронный двигатель с рабочей машиной, то энергия $P_N \cdot s$ (при пренебрежении

потерями) поступает на тот же самый вал. Следовательно, на всем пределе регулировки скорости рабочая машина может получать мощность, равную

$$P_N(1-s) + P_N \cdot s = P_N = \text{const},$$

Это значит, что если асинхронный двигатель имеет мощность 1 000 kW, то, независимо от того, при каком числе оборотов в минуту работает каскадная установка, рабочая машина при любой скорости может брать 1 000 kW. Таково распределение мощностей в случае установки постоянной мощности. Напомним, что, говоря о постоянной мощности, мы имеем в виду эквивалентную мощность двигателя. Мгновенные мощности двигателя на любой скорости изменяются, но так, что эквивалентная мощность будет не выше некоторой постоянной. Это обстоятельство является весьма существенным для понимания процессов регулирования.

В случае установки постоянного момента распределение мощностей между электрическими машинами получается аналогичным, однако вследствие отсутствия механической связи между каскадными агрегатами и валом асинхронного двигателя с рабочей машиной рабочая машина получает при различных скоростях неодинаковую мощность.

Асинхронный двигатель на всем пределе регулировки может получить постоянную мощность $P_N = \text{const}$. Из этой мощности часть $P_N(1-s) = M_N \cdot \omega_r$ в форме механической мощности передается асинхронным двигателем непосредственно рабочей машине. Часть же мощности, равная $P_N \cdot s = M_N(\omega_0 - \omega_r)$, в форме электрической мощности передается через электрическую связь коллекторной машине, включенной в каскад. Последняя, работая в качестве двигателя (при ниже синхронной скорости главного двигателя), преобразовывает энергию в механическую и в форме механической мощности передает ее асинхронной машине АМ, сидящей на том же валу. В свою очередь эта асинхронная машина, работая в качестве асинхронного генератора, преобразовывает механическую энергию в электрическую и возвращает ее обратно в сеть.

Асинхронный генератор оказывается в данном случае обычно необходимым, так как коллекторная машина может работать двигателем лишь при переменном числе оборотов, а при постоянной частоте сети — генератором переменной скорости может быть только асинхронный.

Все рассмотренные случаи относятся к двигательной работе машины, включенной в каскад с асинхронным двигателем. В том случае, когда асинхронный двигатель работает выше синхронной скорости, машина, включенная в каскад, работает генератором, а сочлененная с ней другая машина работает двигателем. В этом случае асинхронный двигатель получает от сети в статор мощность P_N и целиком передает ее в виде механической энергии

рабочей машине. Кроме того он получает в виде электрической мощности мощность $P_N \cdot s$ от вспомогательной машины и превращает ее также в механическую энергию. Суммарная мощность, отданная асинхронным двигателем на вал рабочей машины при выше синхронной скорости двигателя, будет уже не

$$P_N(1-s), \text{ а } P_N(1+s),$$

где s — численное значение отрицательного скольжения.

В установках постоянного момента момент остается постоянным, так как

$$P_N(1+s) = P_N + P_N \cdot s = M_N \cdot \omega_0 + M_N \cdot \omega_0 \cdot \frac{\omega_r - \omega_0}{\omega_0} = M_N \cdot \omega.$$

Несколько сложнее понимание генераторного режима вспомогательной машины в каскаде постоянной мощности. Здесь асинхронный двигатель получает из сети мощность P . Часть мощности $P \cdot (1-s)$ он отдает непосредственно рабочей машине. Часть же мощности $P \cdot s$ он отдает механически машине, сочлененной в каскад. Последняя перерабатывает ее в электрическую энергию и передает ее двигателю. Последний уже вновь превращает ее в механическую и отдает на вал рабочей машины. Таким образом процесс преобразования энергии при выше синхронной скорости асинхронного двигателя в каскаде постоянной мощности сложнее, чем в каскаде постоянного момента.

Число типов каскадных установок, предложенных до сих пор, довольно велико. Как видно будет из дальнейшего, каскадные установки в современной практике несколько утрачивают свое значение. Поэтому мы рассмотрим лишь два главнейших типа каскадов Кремера и Шербиуса, нашедших применение у нас, в СССР, или вообще сравнительно широко распространенных.

Наиболее распространенными в Европе, Америке и других странах света следует считать каскады:

1. Установки по системе Кремера с переделами регулировки $\pm 45\%$.
2. Установки по системе Шербиуса с пределами регулировки $\pm 25\%$.
3. Установки по системе Гейланда (с преобразователем частоты) с регулировкой $\pm 10\%$.
4. Установки по системе Козичека с коллекторной машиной с возбуждением с ротора и регулировкой $\pm 15\%$.

Из-за малого распространения рассмотрение 3 и 4 опускаем.

Знак (+) указывает на то, что регулировка скорости каскада производится только ниже синхронной скорости асинхронного двигателя. Двойной знак (\pm) указывает на то, что скорость асинхронного двигателя регулируется как выше, так и ниже синхронизма. Каждая из этих указанных систем будет рассмотрена как в схеме постоянной мощности, так и в схеме постоянного

момента, ибо число машин, входящих в установку, при $M = \text{const}$ и $P = \text{const}$ различное.

Коллекторные машины в каскадных установках работают в более благоприятных условиях, чем в качестве обычных регулируемых двигателей, в силу малого изменения их скорости. Поэтому некоторые коллекторные машины (например, Шербиуса) конструируются для каскадов мощностью до 1 000 kVA.

Исторически первые каскады постоянной мощности были предложены Кремером (1904 г.): 1) с коллекторным двигателем переменного тока как сериесного, так и шунтового возбуждения и 2) с двигателем постоянного тока в комбинации с одноякорным преобразователем.

Шербиусом (1905 г.) был предложен каскад постоянного момента с шунтовой коллекторной машиной и с двигателем постоянного тока в комбинации с одноякорным преобразователем. С тех пор появилось большое количество каскадов постоянной мощности и постоянного момента с весьма разнообразными трехфазными коллекторными машинами.

На практике нашли наибольшее распространение:

1. Каскады с двигателем постоянного тока через одноякорный преобразователь. За ними на зарубежных заводах и в журнальной литературе установилось наименование систем Кремера независимо от того, как они выполнены—при постоянной мощности или при постоянном моменте.

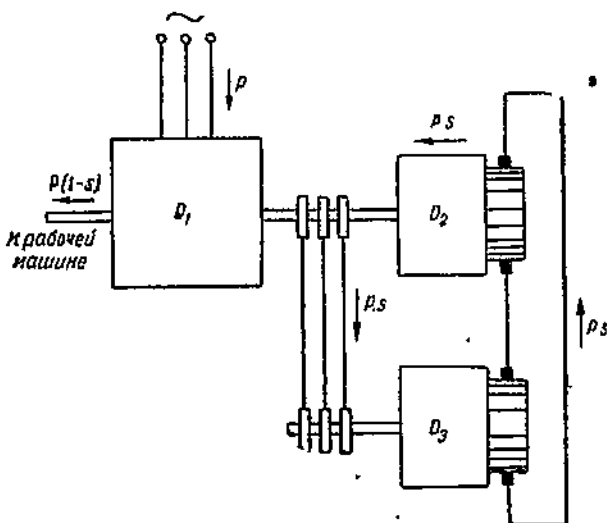
2. Каскады со специальной коллекторной машиной Шербиуса опять-таки при постоянной мощности и постоянном моменте. За ними за границей твердо установилось наименование систем Шербиуса. Такого наименования систем Кремера и Шербиуса в соответствии с наименованиями, принятыми на заводах и в литературе, во избежание существующей иногда путаницы будем придерживаться и мы, не считаясь с утратившими к настоящему времени значение патентными соображениями.

III. Регулирование по системе Кремера

Начнем рассмотрение каскада Кремера с более простой схемы — схемы постоянной мощности.

Каскад Кремера состоит из трех машин (фиг. 292): асинхронного двигателя D_1 , приводящего в движение ту или иную рабочую машину, двигателя постоянного тока D_2 , вращаемого на общий вал с асинхронным двигателем и рабочей машиной, и одноякорного преобразователя D_3 , преобразующего энергию скольжения переменного тока в энергию постоянного тока и передающего эту энергию двигателю постоянного тока. Поскольку система Кремера применяется лишь в мощных установках, то одноякорный преобразователь почти всегда шестифазный.

Пуск агрегата в ход производится таким образом. Переключатель в цепи ротора асинхронного двигателя ставится на пусковой



Фиг. 292. Принципиальная схема каскада Кримера постоянной мощности.

реостат. Статор двигателя включается в сеть, и двигатель разворачивается с рабочей машиной, как в обыкновенной схеме. При этом ни та, ни другая машина, включенная в каскад, не имеют никакого тока возбуждения. После того как асинхронный двигатель достигает скорости, близкой к синхронной, одноякорному преобразователю от возбудителя, приводимого обычно отдельным двигателем, дается нормальное возбуждение постоянного тока. Двигатель постоянного тока возбуждения пока еще не имеет. Переключатель в цепи ротора асинхронного двигателя перебрасывается с пускового реостата на одноякорный преобразователь. Последний, получая на кольца ток малой частоты скольжения, $f_2 = f_1 \cdot s$, автоматически впадает в синхронизм и начинает вращаться с синхронной скоростью, соответствующей частоте скольжения. Якорь двигателя постоянного тока при этом обычно уже связан со щетками одноякорного преобразователя. Далее в обмотку возбуждения двигателя постоянного тока от того же возбудителя дается постоянный ток, меняя величину которого, можно установить желаемое число оборотов в минуту регулируемого агрегата. Для уничтожения влияния в двигателе постоянного тока остаточного магнетизма питание его обмотки возбуждения производится иногда от двух возбудителей по системе согласно-встречного включения.

Процесс изменения скорости агрегата в период регулировки происходит следующим образом. Вначале, пока у двигателя постоянного тока нет возбуждения, напряжение, подведенное к нему от одноякорного преобразователя, оказывается достаточным толь-

ко для того, чтобы покрыть падение напряжения в цепи якоря обеих машин. Двигатель постоянного тока в этом случае играет роль простого добавочного сопротивления в цепи постоянного тока одноякорного преобразователя.

Когда мы даем двигателю ток возбуждения, то на его щетках образуется противо-э. д. с., ибо он вращается асинхронным двигателем. При этом могут быть два случая: индуктированная в двигателе э. д. с. меньше напряжения на щетках одноякорного преобразователя (за вычетом падения напряжения между машинами). Это будет иметь место при медленном изменении тока возбуждения двигателя постоянного тока. В другом случае при резком повышении возбуждения двигателя его э. д. с. может оказаться больше напряжения на щетках преобразователя.

Рассмотрим лишь первый случай. Появление противо-э. д. с. в двигателе или ее увеличение вызывает уменьшение постоянного тока преобразователя. Соответственно снижается его переменный ток, протекающий по обмоткам ротора асинхронного двигателя. Это вызывает уменьшение развиваемого асинхронным двигателем вращающего момента M , так как последний

$$M = c \cdot I_2 \cdot \Phi_s.$$

Но момент нагрузки остался неизменным. Следовательно, двигатель начинает снижать свою скорость до восстановления равновесия. При этом возрастает скольжение, растет частота и напряжение на кольцах асинхронного двигателя и одноякорного преобразователя. Увеличение напряжения переменного тока преобразователя повышает его напряжение на постоянном токе, отчего возрастает сила тока между преобразователем и двигателем постоянного тока и так до восстановления равновесия в токах. При снижении скорости асинхронного двигателя скорость одноякорного преобразователя возрастает, так как растет частота тока на кольцах. Пропорционально увеличивается и напряжение на одноякорном преобразователе.

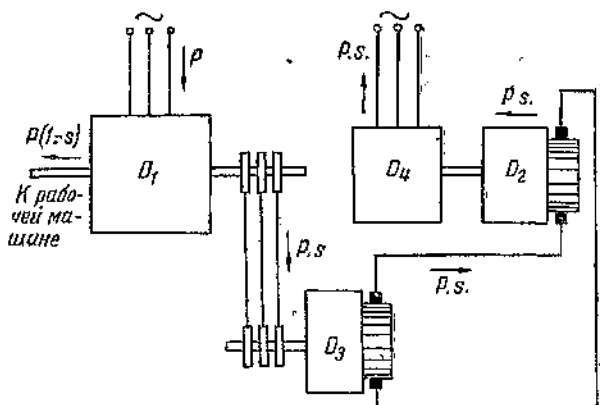
Влияние маховых масс системы на переходный процесс подробно рассмотрено Вейлером (Weiler) [Л. 188].

Принципиальная схема Кремера для постоянного момента показана на фиг. 293.

Особенности работы этой схемы ясны из предыдущего. Пуск и регулировка скорости в ней происходят так же, как и в системе постоянной мощности, только вспомогательный асинхронный двигатель D_1 пускается в ход обычно до пуска главного двигателя D_1 . Вспомогательная асинхронная машина D_1 в этой схеме работает асинхронным генератором с переменным числом оборотов в минуту, возвращая энергию, полученную от двигателя постоянного тока D_2 , обратно в сеть.

Пределы регулировки скорости в системе Кремера ограничиваются $\pm 45\%$ вниз от синхронной скорости. Дальнейшая регулировка оказывается невозможной по условиям работы одноякор-

ного преобразователя, работающего при весьма различных частотах от $0,05 f_1$ до $0,45 f_1$, где f_1 — первичная частота асинхронного двигателя. С увеличением частоты в преобразователе одновременно повышается и его скорость и напряжение на коллекторе. Суммарное действие этих факторов и делает дальнейшую регулировку практически невозможной.



Фиг. 293. Принципиальная схема каскада Кремера постоянного момента.

Кроме того одноякорный преобразователь не может устойчиво работать от 0 до 5% скольжения. Следовательно, соответствующий интервал скоростей также выпадает из регулировки. Причины этого заключаются в том, что преобразователь является синхронной машиной и может устойчиво работать лишь в том случае, когда у него будет достаточная синхронизирующая сила. Она равна

$$P_s = U \cdot I_k$$

где U — напряжение, приложенное к машине; I_k — ток короткого замыкания.

$$I_k = \frac{E}{z_k}$$

следовательно,

$$P_s = \frac{U \cdot E}{z_k} \approx \frac{E^2}{z_k} \approx \frac{U^2}{z_k}$$

где z_k — полное сопротивление машины.

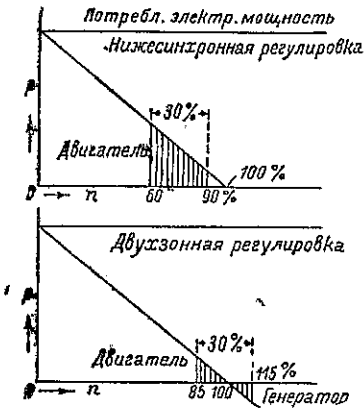
В этом равенстве E приблизительно равно напряжению на кольцах асинхронного двигателя. При малых скольжениях эта э. д. с. становится весьма малой. Полное же сопротивление

$$z_k = \sqrt{R_k^2 + x_k^2} = \sqrt{R_k^2 + (2\pi f_1 s L_m)^2}$$

уменьшается мало, так как при малых частотах начинает играть

большую роль омическое сопротивление. Эти обстоятельства [и обуславливают то, что около синхронизма синхронизирующая сила оказывается очень малой. Преобразователь начинает работать неустойчиво и легко выпадает из синхронизма. Таким образом регулировка по системе Кремера ограничивается пределами от $+5\%$ до $+45\%$.

Принципиально возможна работа системы Кремера и выше синхронной скорости. Для этого нужно изменить на 180° направление всех трех э. д. с., вводимых от преобразователя на кольца асинхронного двигателя. Это может быть сделано посредством специального переключения обмоток асинхронного двигателя. Регулировка выше синхронной скорости протекает вообще вполне нормально. Однако переход через синхронизм требует специального приспособления в виде питаемого из сети преобразователя частоты, так как при синхронизме в роторе асинхронного двигателя исчезает э. д. с., и добавочная э. д. с. должна доставляться дополнительным источником (сетью). Подробно эта проблема рассмотрена при изложении следующей далее системы Шербиуса. Получение регулировки в системе Кремера выше и ниже синхронной скорости имело бы чрезвычайно большое практическое значение. При той же мощности машин, включенных в каскад, пределы регулировки вместо $0,95:0,55 = 1,73$



Фиг. 294. Сравнение мощностей каскадного агрегата при однозонной и двухзонной регулировке.

расширились бы до $1,45:0,55 = 2,63$. Но и при меньших пределах регулировки уменьшилась бы мощность машин, так как вместо регулировки от $s \approx 0$ до скольжения s и при мощности машин, включаемых в каскад $P \cdot s$, мы имели бы мощности машин для выше синхронной скорости $P \cdot s'$, для ниже синхронной скорости $P \cdot s''$, где s' и s'' были бы почти вдвое меньше. Пояснение дает фиг. 294, где пределы регулировки приняты в 30% для ниже синхронной регулировки и в $\pm 15\%$ для регулировки выше и ниже синхронной скорости.

Для первого случая регулировка от 0 до 10% по условиям устойчивости выброшена. Включенная в каскад машина работает здесь, на всем интервале регулировки, как двигатель. Во втором случае машина, включенная в каскад, работает как двигатель ниже синхронной скорости и как генератор выше синхронной скорости.

Такой переход через синхронизм в системе Кремера (с добавлением преобразователя частоты) был испытан экспериментально в Германии и осуществить его удалось. Аналогичные опыты были проделаны в Электромашинной лаборатории ЛПИ

проф. Костенко. Однако опыт показывает, что такая система Кремера хорошо переходит через синхронизм лишь вхолостую. Уже при небольших нагрузках устойчивость одноякорного преобразователя оказывается недостаточной, и он выпадает из синхронизма. А так как на практике приводы больших мощностей приходится проводить через весь регулируемый ряд плавно и под нагрузкой (например, шахтный вентилятор, прокатный стан, идущий вхолостую), то до настоящего времени система Кремера для регулировки выше и ниже синхронной скорости осталась пока практически нигде не осуществленной.

Поскольку система Кремера чаще всего устанавливается на прокатных станах с маховиками, имеющими пиковую нагрузку, то желательно ее компаундирование. Последнее производится компаундированием двигателя постоянного тока. Автоматическое повышение в. д. с. двигателя при увеличении нагрузки будет в нужной мере снижать скорость асинхронного двигателя. Компаундирование может быть выполнено непосредственно путем устройства на двигателе компаундной обмотки или путем компаундирования возбуждителя двигателя.

Как отмечено выше, регулировка скорости каскадного агрегата в системе Кремера производится током возбуждения двигателя постоянного тока. Изменение этого тока сказывается лишь на скорости асинхронного двигателя почти без всякого влияния или с ничтожным влиянием на его $\cos \phi$. В свою очередь сколько бы мы ни меняли ток возбуждения одноякорного преобразователя, это не отражается на скорости каскадного агрегата, так как одноякорный преобразователь является синхронной машиной. Изменение его тока возбуждения будет вызывать между асинхронным двигателем и одноякорным преобразователем только реактивные токи. Таким образом, регулируя ток возбуждения одноякорного преобразователя, мы можем добиться того, чтобы $\cos \phi$ асинхронного двигателя был равен единице. Однако на практике такая компенсация в системе Кремера применяется далеко не всегда по той простой причине, что в одноякорном преобразователе переменный активный и постоянный токи направлены навстречу друг другу, и потери от этих двух токов получаются небольшие. Реактивный же ток преобразователя постоянным током не компенсируется, а потому он вызывает увеличение нагрева машины, а следовательно, и увеличение ее габаритов. Вот почему в большинстве установок Кремера компенсация $\cos \phi$ до единицы обычно не производится.

Система Кремера ранее находила за границей широкое распространение. Она изготовляется почти всеми зарубежными динамостроительными фирмами. У нас ее изготовляют ХЭМЗ и „Электросила“.

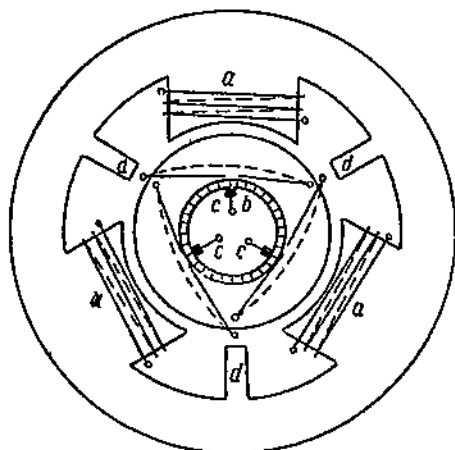
По причинам, которые изложены ниже при сравнении систем Кремера и Шербиуса, каскад Кремера осуществляется обычно в форме каскада постоянной мощности.

У нас, в СССР, система Кремера нашла применение более чем в 10 установках. Почти все эти установки служат для привода прокатных станов.

Наибольшие по мощности установки по системе Кремера выполнены в США. Одна из них имеет мощность асинхронного двигателя 5 600/3 000 kW, 2 200 V, 250/134 об/мин, вторая — 3 300/3 300 kW, 2 200 V, 500/300 об/мин.

112. Регулирование по системе Шербиуса

Система Шербиуса характеризуется применением особой машины Шербиуса. Машина Шербиуса представляет собой трехфазную компенсированную коллекторную машину со статорным возбуждением с явно выраженными полюсами. Схематически в разрезе она представлена на фиг. 295.



Фиг. 295. Машина Шербиуса.

Главная особенность машины Шербиуса заключается в том, что она имеет явно выраженные полюса, благодаря чему в ней отсутствует вращающееся магнитное поле, а есть только поле пульсирующее. Если взять коллекторную машину с неявно выраженными полюсами, т. е. с вращающимся полем, то в ее секциях, замкнутых накоротко щетками, всегда будут индуктироваться э. д. с., что сильно утяжеляет коммутацию машины.

В машине Шербиуса якорная обмотка выполняется с шагом, укороченным до 120° . Статор имеет три выступа, расположенных под углом в 120° . Эти три выступа соответствуют двум полюсам. В машине с четырьмя полюсами число выступов будет шесть и т. д. При таком выполнении обмотки и расположении щеток под выступами одна сторона коротко замкнутого витка оказывается между первым и вторым выступом, вторая сторона между вторым и третьим выступом и т. д. (ширина катушки получается 120°). Конструкция явно выраженных полюсов дает возможность расположить между главными выступами добавочные полюса со специальными обмотками. Эти добавочные полюса индуктируют в короткозамкнутой секции такую э. д. с., которая гасит как реактивную э. д. с., т. е. уничтожает влияние самоиндукции короткозамкнутой секции, так и э. д. с. пульсационного характера.

Благодаря своим конструктивным свойствам машина Шербиуса коммутирует в хороших условиях при мощностях и частотах значительно больших, чем это удастся получить в других коллекторных машинах переменного тока с неявно выраженными полюсами.

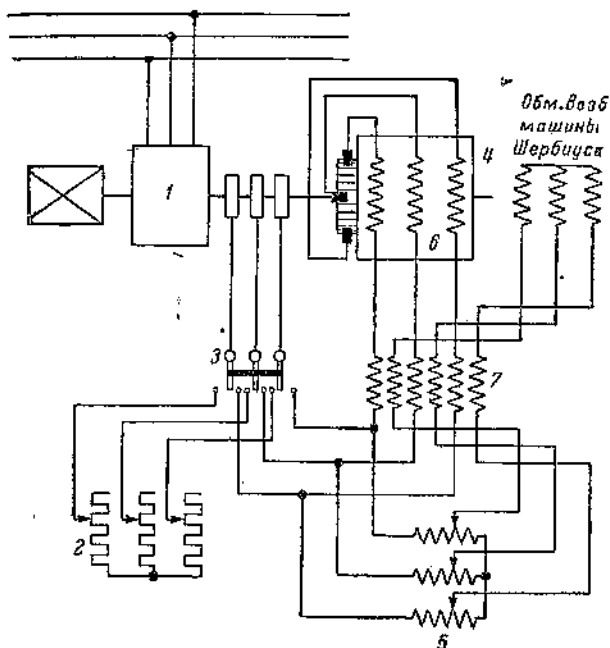
Из других особенностей машины Шербиуса нужно отметить то обстоятельство, что частота тока возбуждения должна быть обязательно равна частоте тока, который мы хотим получить или принять на щетки якоря. Если машина Шербиуса должна давать ток частоты 10 Hz, то она должна получать ток возбуждения частоты тоже 10 Hz. Отсюда следует, что если в обмотку возбуждения машины Шербиуса мы подадим постоянный ток, то щеток машины мы получим также постоянный ток. По принципу генерирования э. д. с. машина Шербиуса является подобием машины постоянного тока.

Рассмотрим схему Шербиуса для постоянной мощности при регулировке скорости ниже синхронной (фиг. 296). В случае схемы постоянной мощности коллекторная машина Шербиуса 4 насаживается непосредственно на вал асинхронного двигателя 1, связанного с рабочей машиной. Щетки машины Шербиуса через компенсационную обмотку 6 и переключатель в цепи ротора 3 связываются с кольцами асинхронного двигателя.

Очевидно, что для осуществления такой связи частота э. д. с. машины Шербиуса должна быть равна частоте э. д. с. ротора двигателя. Из предыдущего ясно, что для выполнения этого условия машина Шербиуса должна возбуждаться током частоты скольжения. С этой целью обмотка возбуждения машины Шербиуса через регулируемый трансформатор или автотрансформатор 5 также включается на кольца асинхронного двигателя. Пуск системы производится включением ротора двигателя на пусковой реостат 2. После достижения двигателем скорости, близкой к синхронной, ротор переключается на машину Шербиуса без возбуждения, после чего регулируется ток возбуждения этой машины до получения надлежащей скорости агрегата. Идея регулировки остается такой же, как и в системе Кремера. Меняя возбуждение машины Шербиуса, мы меняем значение добавочной э. д. с., вводимой на кольца асинхронного двигателя. Только в системе Кремера это делается в двигателе постоянного тока через одноякорный преобразователь. Здесь же регулировка ведется в машине Шербиуса.

Так как э. д. с. машины Шербиуса почти не зависит от нагрузки асинхронного двигателя, то каскадный агрегат без добавочных приспособлений имеет шунтовую характеристику. Если требуется асинхронному двигателю придать компаундную характеристику, необходимо компаундировать машину Шербиуса. Это достигается включением в цепь возбуждения машины Шербиуса последовательного трансформатора 7 (фиг. 296).

По условиям коммутации машины Шербиуса регулировка скорости с ней возможна на 25% от синхронной скорости асин-



Фиг. 296. Однозвонный каскад Шербиуса постоянной мощности.

хронного двигателя, пока частота тока в ней не превышает 10—15 Hz. Это как раз и имеет место при 25% скольжения в случае первичной частоты в 50 Hz. При больших частотах машина Шербиуса в коммутационном отношении работает не совсем удовлетворительно. Благодаря свойствам машины Шербиуса в отношении связи частоты тока главной цепи и возбуждения равенство частот машины Шербиуса и асинхронного двигателя поддерживается совершенно автоматически.

Возбуждение машины Шербиуса через автотрансформатор широко применяется американской фирмой GEC до больших мощностей и никаких затруднений не встречает, так как для переключения зажимов автотрансформатора американская практика широко использует автоматические контакторные системы. В Европе более распространено ручное управление автотрансформатором, а потому для его упрощения фирма BBC (это вторая фирма, изготовляющая эту систему, предложившая ее и больше всех ее усовершенствовавшая) использует добавочный возбудитель, представляющий также маленькую машину Шербиуса, а потому обладающий всеми ее свойствами. Цепь возбуждения этого возбудителя питается с колец асинхронного двигателя. Возбудитель, получая в обмотку возбуждения ток частоты скольжения, дает со своих щеток в обмотку возбуждения машины Шербиуса опять-

таки ток частоты скольжения. Таким образом равенство частот ротора асинхронного двигателя и машины Шербиуса автоматически соблюдается и в этой схеме.

Приведенная схема дает возможность производить регулировку скорости асинхронного двигателя только ниже синхронной (однозонную). Для перехода через синхронную скорость необходимо применение преобразователя частоты.

Сам по себе, без добавочного приспособления, агрегат перейти на синхронную скорость не может, так как асинхронный двигатель один при синхронной скорости вращаться не может. При синхронной скорости вращающееся магнитное поле статора идет с такой же скоростью, что и ротор, и в обмотке последнего никакой э. д. с. не будет. Напряжение на кольцах ротора будет равно нулю. Будет равен нулю и ток возбуждения машины Шербиуса. Асинхронный двигатель не будет развивать вращающего момента. Очевидно, что в схему нужно ввести такой электромагнитный механизм, который при синхронизме давал бы ток в обмотку ротора асинхронного двигателя или в обмотку возбуждения машины Шербиуса. Таким механизмом является преобразователь частоты, обязательно механически связанный с валом асинхронного двигателя.

Преобразователь частоты представляет собой в основном якорь машины постоянного тока, снабженный дополнительными контактными кольцами. В большинстве случаев преобразователь частоты статора не имеет, если же последний и устраивается, то на нем чаще всего никакой обмотки нет. Статор играет лишь роль магнитопровода. Дополнительная обмотка на статоре устраивается иногда исключительно в целях улучшения коммутации.

Так как преобразователь частоты не обладает двумя магнитными потоками, то он не может сам по себе создавать никакого вращающего момента, а может лишь преобразовывать один род тока в другой.

Если к кольцам преобразователя мы подведем переменный ток в 50 Гц и если преобразователь будет неподвижен, то на щетках коллектора будет напряжение также частоты 50 Гц. Если же, подводя к преобразователю напряжение частоты 50 Гц, мы будем его вращать, то на щетках его коллектора мы получим большую или меньшую частоту в зависимости от того, в какую сторону мы будем вращать преобразователь. При вращении по полю мы получим меньшие частоты, против поля—большие. Если преобразователь частоты будет вращаться с синхронной скоростью, то при одном направлении его вращения мы получим со щеток коллектора постоянный ток, при другом направлении вращения,—ток двойной частоты.

В данном случае преобразователь частоты сидит на валу асинхронного двигателя, т. е. он всегда вращается со скоростью ротора. Питается преобразователь через кольца той же частотой, что и статор асинхронного двигателя. Поэтому при надлежащем

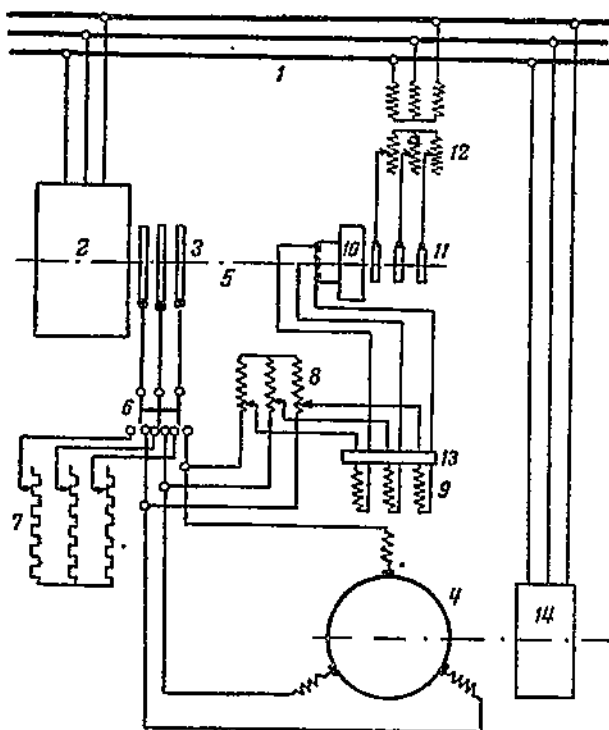
направлении вращения на щетках коллектора преобразователя частоты мы всегда будем иметь напряжение частоты скольжения.

Если механическую скорость преобразователя мы будем характеризовать частотой вращения, то получим следующие соотношения скоростей. Вращающееся магнитное поле преобразователя вращается со скоростью f_1 , где f_1 — частота сети. Сам преобразователь вращается механически асинхронным двигателем со скоростью $f_1 \cdot (1-s)$. Следовательно, при вращении преобразователя по полю мы на щетках коллектора будем получать э. д. с. частоты $f_x = f_1 - f_1(1-s) = f_1 s = f_2$, т. е. частоты тока ротора. Таким образом механическое сочленение преобразователя частоты с асинхронным двигателем дает возможность автоматически получать на щетках преобразователя частоту скольжения.

При синхронной скорости асинхронного двигателя преобразователь частоты может в ротор его дать ток, необходимый для создания вращающего момента. Таким образом на преобразователе частоты ложится роль покрытия омического падения напряжения в цепи ротора при синхронизме. При скорости, отличной от синхронной, преобразователь частоты принципиально не нужен, однако он остается в схеме по некоторым соображениям и покрывает омическое падение напряжения от активного тока. Для того чтобы преобразователь частоты 10 (фиг. 297), можно было сконструировать на меньшую силу тока, он вводится не в цепь ротора, а в цепь возбуждения машины Шербиуса 9. Эта последняя, получая при синхронизме постоянный ток в свою обмотку возбуждения, подает постоянный ток в ротор асинхронного двигателя 2. Поскольку обмотка преобразователя частоты представляет замкнутый треугольник, то ее приходится вводить в нулевую точку обмотки возбуждения машины Шербиуса.

Из предыдущего видно, что на преобразователь частоты ложится лишь роль покрытия омического падения напряжения от активного тока в цепи возбуждения машины Шербиуса, включая и ротор асинхронного двигателя. Следовательно, преобразователь должен давать весьма малое напряжение. Но преобразователь частоты является механизмом, меняющим лишь частоту переменного тока, а не величину напряжения. Число витков между любыми двумя кольцами остается всегда равным числу витков между любыми двумя щетками. Поэтому для получения нужного напряжения он включается на сеть через регулируемый трансформатор 12.

Для перехода через синхронизм необходимо изменять на 180° направление э. д. с. машины Шербиуса. Так как это переключение в главной цепи машины Шербиуса сделать невозможно (поворот щеток недопустим), то приходится изменять на 180° направление токов возбуждения. Это достигается тем, что с помощью переключателя 13 все три фазы обмотки возбуждения 9 переключаются, т. е. концы и начала их меняются местами. Переход через



Фиг. 297. Двухзонный каскад Шербиуса с регулировочной трансформатором.

1—сеть; 2—главный асинхронный двигатель; 3—кольца; 4—машина Шербиуса; 5—вал; 6—переключатель; 7—пусковой реактор; 8—возбуждающий трансформатор; 9—обмотки возбуждения; 10—преобразователь частоты; 11—его кольца; 12—трансформатор; 13—переключатель; 14—вспомогательный асинхронный двигатель.

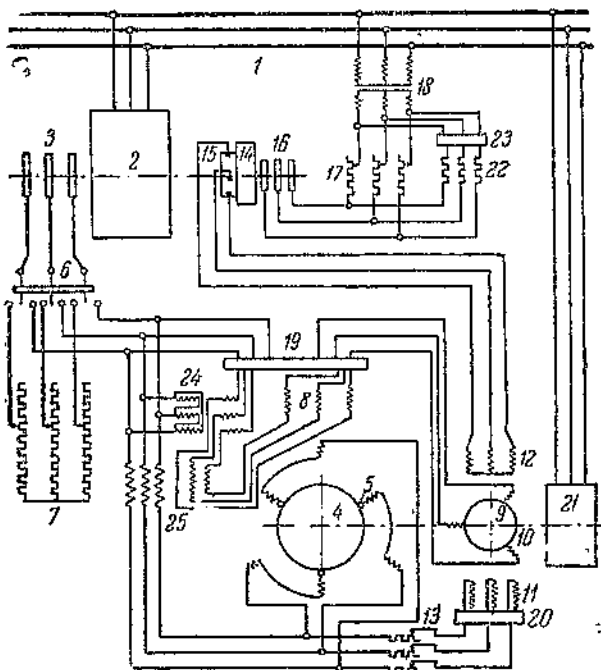
весь интервал регулировки скорости от (+25%) до (-25%) от синхронной скорости производится совершенно плавно.

На фиг. 298 представлена несколько усложненная схема Шербиуса для постоянного момента с добавочным возбудителем в виде малой машины Шербиуса. В ней на возбудителе 9 также предусмотрена для преобразователя частоты особая обмотка возбуждения 12. Однако преобразователь частоты 14 включен на вторичную обмотку трансформатора 18 через два сопротивления: нерегулируемое, но отключаемое 22, и регулируемое 17.

На преобразователь частоты переносится в этой схеме не только покрытие омического падения напряжения в цепи машины Шербиуса при синхронизме, но и покрытие омического падения напряжения от возбуждающего тока на всем интервале регулировки. Это падение напряжения пропорционально возбуждающему току машины 4. Последний в свою очередь пропорционален

напряжению машины Шербиуса, т. е. скольжению асинхронного двигателя. Это и обуславливает наличие регулируемого сопротивления 17.

Компаундирование системы осуществляется с помощью последовательного трансформатора 25, вводимого в цепь возбуждающей обмотки 8 машины Шербиуса.



Фиг. 298. Полная принципиальная схема каскада Шербиуса¹

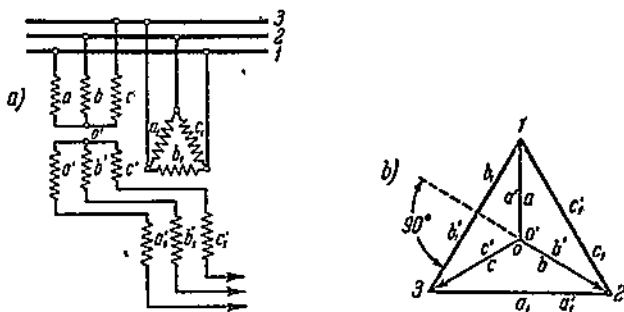
1—сети; 2—главный асинхронный двигатель; 3—кольца; 4—машина Шербиуса; 5—компенсационная обмотка; 6—переключатель; 7—пусковой реостат; 8—обмотка возбуждения машины Шербиуса; 9—возбудитель; 10—его компенсационная обмотка; 11—его обмотка возбуждения; 12—обмотка возбуждения возбудителя; 13—регулируемое сопротивление; 14—преобразователь частоты; 15 и 16—его коллектор и кольца; 17—реостат; 18—трансформатор для преобразователя частоты; 19 и 20—переключатели; 21—вспомогательный асинхронный двигатель; 22—сопротивление; 23—выключатели; 24—компенсирующий трансформатор; 25—компаундирующий трансформатор.

В отличие от системы Кремера система Шербиуса всегда выполняется с компенсацией $\cos \phi$ асинхронного двигателя до 1. Для компенсации в цепь возбуждения машины Шербиуса нужно ввести составляющую э. д. с., сдвинутую по отношению к напряжению на кольцах на 90° . Это достигается посредством особого компенсационного трансформатора 24, с включением первичных обмоток треугольником, а вторичных — разомкнутой звездой. Пояснение дано на фиг. 299.

Очевидно, что напряжения a', b', c' смещены относительно напряжений a'_1, b'_1, c'_1 на 90° , что и дает необходимый для компенсации добавочный сдвиг э. д. с.

Система Шербиуса изготовляется всего лишь двумя зарубежными фирмами — ВВС и ГЕС. У нас в СССР она пока не производится.

Каскад по системе Шербиуса находил раньше большое применение на прокатных станах, шахтных вентиляторах, доменных



Фиг. 299. Изменение фазы э. д. с. путем комбинации включения обмоток трансформаторов в целях компенсации $\cos \varphi$.

воздуходувках и центробежных насосах высокого давления. Наибольшее распространение имеют приводы на прокатных станах. Так, из 52 приводов, выполненных фирмой ВВС к 1927 г., 34 установлены на станах и 11 на шахтных вентиляторах. Фирмой ГЕС на прокатных станах установлено 65 комплектов. Заметим, что из всех каскадов Шербиуса только 34% установок фирмы ГЕС и только 10% установок ВВС выполнены по принципу каскада, постоянной мощности. Все остальные осуществлены по принципу постоянного момента. В СССР мы имеем всего три привода по системе Шербиуса. Один из них выполнен в 1927 г. ВВС для проволочного стана завода „Красная Этна“ (г. Горький). Установка имеет мощность асинхронного двигателя в 1470 kW, 250 об/мин, 6300 V, 170 A, 50 Hz при $\cos \varphi = 0,86$ и $\eta = 92,5$. Пределы регулировки скорости — от 205 до 305 об/мин.

В целях удешевления каскадного агрегата в нем применены две коллекторные машины Шербиуса, включенные в параллель, каждая на 215 kVA, 250 V, 500 A, 1500 об/мин.

Вторая установка была применена для вентилятора на одной из шахт Донбасса. Третья установка лабораторного типа той же фирмы ВВС выполнена в лаборатории электрооборудования ЛПИ.

В качестве наибольших, достигнутых к настоящему времени мощностей для каскада Шербиуса можно привести следующие установки на прокатных станах США и Англии:

1) асинхронный двигатель 5000/2200 kW, 500/250 об/мин, 25 Hz и две машины Шербиуса по 650 kVA, 500 об/мин (США, фирма ГЕС);

- 2) асинхронный двигатель 4180/3350/2510 kW, 156/125/93 об/мин, 6600 V, 25 Hz; машина Шербиуса 850 kVA (США, GEC);
 3) асинхронный двигатель 2220/2220/2220 kW, 470/375/280 об/мин; машина Шербиуса 950 kVA, 375 об/мин (Англия—фирма British Thomson-Houston).

Как видно, во всех случаях пределы регулировки составляют $\pm 25\%$ от синхронной скорости, т. е. отношение максимального числа оборотов в минуту к минимальному получается 1,67.

113. Сравнение систем Кремера и Шербиуса

Системы Кремера и Шербиуса дают возможность регулировать скорость асинхронного двигателя примерно в одинаковых пределах. В первой системе достижимое отношение максимальной и минимальной скоростей равно 1,8, во второй—1,67. В техническом отношении обе системы являются почти равноценными. Поэтому представляется важным выяснить их преимущества и недостатки и сравнить их в экономическом отношении.

Естественно, говоря об этих системах, необходимо сравнить и их эксплуатационную экономичность, т. е. к. п. д. Это сравнение весьма затруднительно, так как для вопросов экономики важен не нормальный, а средний к. п. д. систем, зависящий от длительности регулировки на ту или другую скорость.

Разные мощности двигателей и разные типы установок не дают перевеса одной системы над другой. Если же учесть, что в работе прокатных станков, на которых используются преимущественно данные установки, большую роль играют паузы между пропусками металла через валки, то можно прийти к заключению, что к. п. д. систем Кремера и Шербиуса почти не могут служить одной из баз для сравнения экономичности этих установок.

Обратимся к вопросам эксплуатации. Система Шербиуса включает в себя весьма сложную по физическим процессам машину Шербиуса с весьма сложной цепью возбуждения. Выше эти вопросы толковались несколько упрощенно, без полного учета влияния всех активных и реактивных сопротивлений. Если машины, входящие в систему Кремера, понятны обычно обслуживающему персоналу, то понимание всех процессов системы Шербиуса рядовым монтажерам по существу мало доступно. В этом отношении система Шербиуса во много раз сложнее. При таких условиях можно полагать, что в случае серьезных неполадок с системой Шербиуса заводской персонал с ним может не справиться, и машины для ремонта необходимо отправлять на динамостроительный завод или ждать оттуда хорошо знающего эту систему персонала. Эти обстоятельства на первый взгляд как будто говорят против системы Шербиуса. Однако эта система применена на практике фирмами ВВС и GEC в 117 установках, которые работают вполне надежно. Поэтому к выбору между системой Шербиуса и Кремера нужно подходить из других соображений.

Базой для сравнения двух систем в основном должны служить лишь капитальные затраты, так как эксплуатационные расходы следует считать примерно одинаковыми.

Сразу может показаться, что система Шербиуса всегда будет благоприятнее, так как, давая возможность регулировки выше и ниже синхронной скорости (чего практически нет в системе Кремера), она требует всегда меньше на одну машину (отпадает одноякорный преобразователь). Кроме того каждая машина, включаемая в каскад, имеет в системе Шербиуса для двухзонной регулировки мощность, примерно в два раза меньшую. Установленная мощность машин каскадного агрегата получается в системе Шербиуса вдвое (или более) меньше. Однако стоимость машин не может быть расценена только по установленной мощности. Стоимость за кВт машин системы Кремера значительно ниже, чем машины Шербиуса. В систему Кремера входят стандартные машины постоянного тока — двигатель и одноякорный преобразователь. Эти машины идут и для других целей, кроме каскадных установок. Машина же Шербиуса работает исключительно в каскадах. Число таких установок невелико, установки не аналогичны. Стандартизовать машины Шербиуса труднее, так как чуть ли не каждая прокатная установка имеет свое собственное число оборотов в минуту, обусловленное в каскаде постоянной мощности рациональным сочленением двигателя с прокатным станом. Эти обстоятельства удорожают производство машин Шербиуса. Машина Шербиуса работает совершеннее при мало меняющемся числе оборотов в минуту. С этой точки зрения она больше подходит для отдельной установки от регулируемого ею двигателя, т. е. для каскада постоянного момента. В подобных условиях облегчается и стандартизация машин Шербиуса, так как она становится независимой от скорости асинхронного двигателя.

Все это приводит к заключению, что система Шербиуса больше подходит для установок постоянного момента. В свою очередь система Кремера по схеме каскада постоянного момента оказывается по стоимости значительно выше системы Шербиуса из-за большого числа машин значительной мощности. Экономические подсчеты показывают, что систему Кремера следует считать наиболее экономичной для постоянной мощности, систему Шербиуса — для постоянного момента. На этом и можно базироваться на практике, выбирая между системой Кремера и Шербиуса в новых установках.

В наших условиях временно (до постановки соответствующего производства на заводах СССР) приходится отказываться от применения системы Шербиуса, ибо, фиксируя необходимость установки Шербиуса, мы должны были бы пока эту систему выписывать из-за границы, затрачивая валюту. Нам целесообразнее пойти на применение менее экономичной в целом системы Кремера, но изготовляемой на наших заводах. Вот почему в приводах постоянного момента мы в последнее время применяли также систе-

му Кремера. Однако изготовление этой системы по типу каскада постоянного момента весьма невыгодно. Мы шли на применение каскада Кремера постоянной мощности для приводов постоянного момента. Система получается не полностью использованной, но зато мы освобождаемся от импорта.

114. Перспективы применения каскадных установок

Поскольку пределы регулирования каскадных установок Кремера и Шербиуса ограничиваются цифрами 1:1,8 и 1,67, а в каскаде Гейланда еще меньше, а промышленность в большинстве случаев требует больших пределов регулирования мощных установок, то в современной практике каскадные регулируемые установки несколько утрачивают свое значение. Практически они применялись лишь к мощным установкам прокатных станов, шахтных вентиляторов и воздуходувок. В силу видоизменения кинематики прокатных станов, вызванных влиянием электропривода, большинство переверсивных регулируемых прокатных станов имеют многодвигательный привод, а в таких случаях, как рассмотрено далее в гл. IX, наиболее экономичными и целесообразными оказываются двигатели постоянного тока. Лишь в одноклетевых регулируемых станах с одним двигателем с малыми пределами регулировки оказывается целесообразным применение каскадных установок. Поэтому-то за годы Сталинских пятилеток у нас не установлено ни одного каскада Шербиуса и меньше 10 каскадов Кремера. Все подходящие приводы снабжены двигателями постоянного тока. На долю каскадов остается сравнительно ограниченное количество приводов.

Аналогичное положение по существу мы имеем и с каскадами для улучшения $\cos \varphi$, представляющими комбинацию асинхронных двигателей с компенсаторами фаз. В силу редкого применения компенсаторов фаз и возможности достигнуть высокого $\cos \varphi$ установок другими путями этот тип каскадных установок в современной практике также утрачивает свое прежнее значение.

Это обстоятельство становится еще более существенным, если мы учтем имевшее место дальнейшее развитие системы Леонарда в направлении непрерывного управления.

За годы войны против фашизма в США был запроектирован каскадный электропривод вентилятора для аэродинамической трубы мощностью в 30 000 kW с пределами регулирования от 300 до 50 об/мин. В нем главный асинхронный двигатель включен в каскад с синхронным генератором. Последний вращается двигателями постоянного тока, управляемыми по системе Леонарда [Л. 189—192; 33].

ГЛАВА VIII

СИНХРОНИЗАЦИЯ ХОДА, ПОДДЕРЖАНИЕ ПОСТОЯНСТВА СКОРОСТИ И НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

115. Практическое значение вопроса о синхронизации хода и поддержании постоянства скорости и возможные способы решения задачи

В целом ряде промышленных электроприводов по условиям конструкции исполнительного механизма или по условиям производственного процесса оказывается необходимым или получение строго синхронного хода нескольких двигателей или поддержание постоянства их скорости с той или иной точностью. При современном многодвигательном приводе отдельных исполнительных механизмов эти вопросы приобрели очень большое значение.

Некоторые двигатели, требующие поддержания синхронности хода или постоянства скорости при изменении нагрузки, нормально работают с одной скоростью, и в них необходимо согласование работы двигателей лишь во время пускового или тормозного периодов и при одной определенной установившейся скорости. Однако чаще всего такого согласования требуют регулируемые приводы. В них необходима согласованность скоростей как во время пуска, так и при любой установленной скорости.

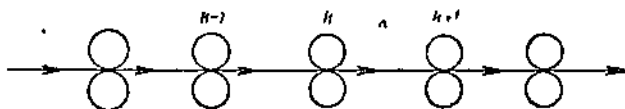
Синхронные двигатели для регулируемых электроприводов практически не подходят, к тому же производственные условия по ходу работы обычно требуют возможности изменения соотношения скоростей отдельных двигателей.

Поэтому в данной главе мы будем рассматривать вопросы синхронизации хода и поддержания постоянства скорости применительно к двигателям асинхронным, постоянного тока и шунтовым коллекторным.

Приведем несколько примеров, где требуется выполнение вышеуказанных условий. С необходимостью синхронизации хода наиболее часто приходится сталкиваться в некоторых подъемно-транспортных устройствах, приводимых во вращение несколькими двигателями, например, перегрузочном порталном кране или в некоторых конструкциях разводного пролета моста через реку. Положим, что привод порталного крана осуществляется двумя или

четырьмя двигателями. По конструктивным соображениям здесь оказывается целесообразным применять привод от нескольких двигателей, не устраивая между ними общего длинного дорогого вала. К тому же пространство между опорами, составляющее по длине десятки метров, не может быть загромождено соединительным валом. Последний пришлось бы проложить по ферме, связав его с двигателями вертикальными валами, идущими по опорам. Во избежание перекоса конструкции крана все двигатели должны идти строго синхронно.

В некоторых конструкциях разводных пролетов мостов требуется, чтобы смыкание и размыкание поднимаемых крыльев в замке происходили строго синхронно. С необходимостью синхронизации приходится сталкиваться также в некоторых конструкциях слипов (подъемных устройств для судов), в шлюзовых устройствах (синхронизация применена в приводе сегментных затворов шлюзов на канале Москва-Волга) и в других подъемно-транспортных устройствах. Синхронизация требуется также для некоторых машин, для летучих ножниц, режущих на ходу металл, выходящий из валков прокатного стана, для привода некоторых аппаратов автоматического управления промышленными механизмами.



Фиг. 300. Схема прохождения металла между отдельными клетями непрерывного прокатного стана.

Синхронизация хода в указанных случаях оказывается совершенно необходимой по условиям работы приводимого механизма. В последнее время в отдельных случаях ставится вопрос о синхронизации хода отдельных элементов некоторых металлорежущих станков в связи с упрощением в них кинематических связей.

К другой категории процессов, требующих поддержания постоянства скорости, относятся непрерывные регулируемые прокатные станы горячей прокатки, станы-тандем холодной прокатки, бумагоделательные машины, ротационные машины полиграфической промышленности, некоторые отдельные механизмы текстильной промышленности. Для примера на фиг. 300 представлена схема прохождения металла в некотором непрерывном прокатном стане. Прокатываемый металл, выходя из какой-либо клетки k , имеет вполне определенную длину, обусловленную вытяжкой металла в этой клетке. Валки клетки $(k+1)$ должны идти с вполне определенной скоростью, зависящей от скорости валков клетки k и соотношения диаметров клетки валков (k) и $(k+1)$.

Если валки клетки $(k+1)$ будут идти с недостаточной скоростью, то между клетями (k) и $(k+1)$ будет образовываться петля из металла, что при тонких сортах металла может привести к за-

путыванию металла и его порче. Если же клеть за $(k+1)$ пойдет с большей скоростью, чем необходимо, то металл между клетями (k) и $(k+1)$ будет получать дополнительное растяжение, т. е. дополнительное сужение сечения в отдельных местах, совершенно не предусмотренное производственным процессом. Результатом будет опять-таки порча металла.

Таким образом для рационального выполнения производственного процесса прокатки в подобных непрерывных прокатных станах необходимо поддержание определенного соотношения скоростей валков отдельных клетей, зависящего от формы прокатываемого профиля металла. Строгой синхронизации отдельных клетей здесь не требуется. В свою очередь вопрос поддержания постоянства скорости в данном случае усложняется еще тем обстоятельством, что соотношение скоростей должно соблюдаться как при одновременной прокатке металла во всех клетях, так и для того случая, когда металл, положим, имеется в клетях k и металла еще нет в клетях $(k+1)$. Этот случай соответствует захвату металла клетью $(k+1)$. Получающиеся при этом условия применительно к двигателям постоянного тока рассмотрены в п. 59.

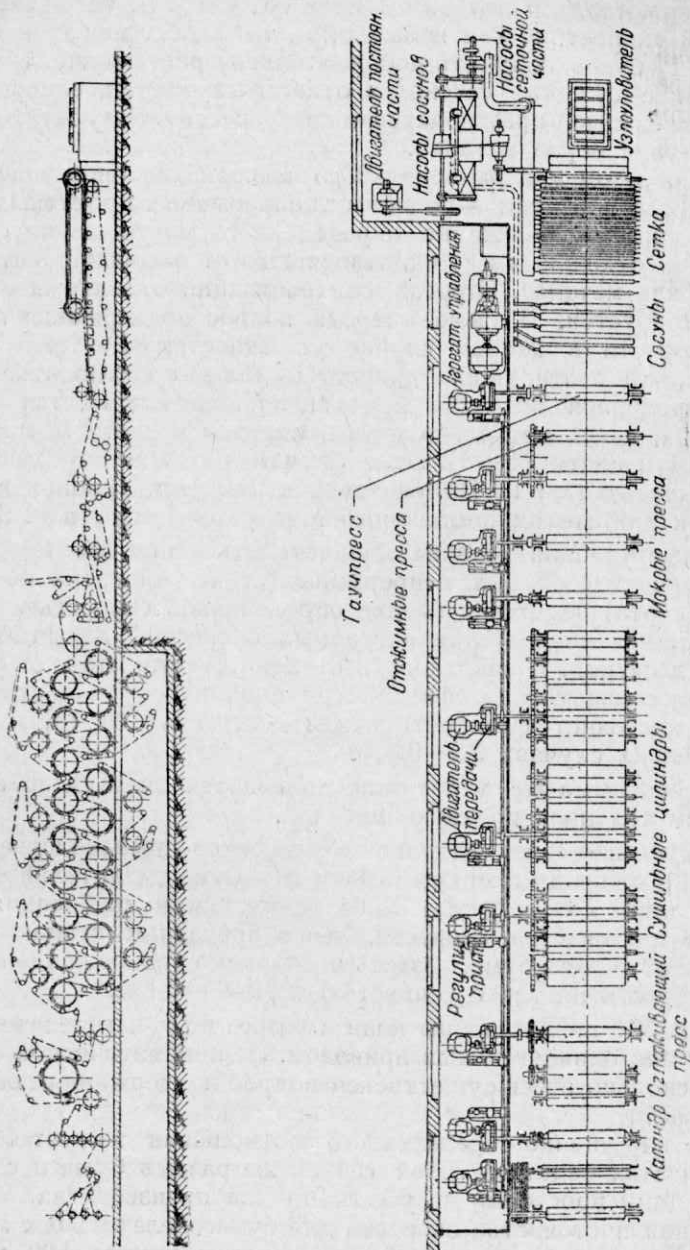
Подобные условия должны осуществляться при разных скоростях, так как в сортовых непрерывных станах прокатка каждого профиля (сорта) ведется с вполне определенной скоростью. В отдельных станах число устанавливаемых скоростей достигает нескольких десятков. В зависимости от конструкции стана и сортамента прокатываемых профилей требуемая здесь точность поддержания постоянства скорости может достигать 0,5—1% и лишь в очень редких случаях 0,2—0,3%.

С аналогичными же условиями приходится иметь дело в станах тандем холодной прокатки металла.

Подобную же связь отдельных элементов производственного механизма полупродуктом мы имеем и в бумагоделательной машине, но лишь со значительно более жесткими требованиями в отношении постоянства скорости, чем в прокатных станах. В зависимости от сорта бумаги здесь необходимо поддержание постоянства скорости иногда с точностью до 0,05—0,1%.

На фиг. 301 представлены план и разрез по бумагоделательной машине с многодвигательным приводом. Из кинематической схемы видно, насколько здесь существенен вопрос поддержания постоянства скорости.

Всякое нарушение определенного соотношения скоростей в отдельных частях ведет за собой сейчас же разрыв бумаги с соответствующими простоями и убытками для производства. Вопрос поддержания постоянства скорости для бумагоделательных машин особенно серьезен. Скорость бумаги иногда достигает 500 м/мин. Дело осложняется тем, что в специальных машинах, изготавливающих высококачественные сорта бумаги (фотографическая, чертежная, сорта, идущие на изготовление государственных бумаг), пре-



Фиг. 301. План и разрез по бумагоделательной машине.

делу регулировки достигают отношения 1:12. Число устанавливаемых скоростей на этом интервале иногда доходит до 1000.

Устранение причин, влияющих на постоянство скорости двигателя, здесь невозможно по условиям самого производственного процесса. Хотя улучшение механической конструкции бумагоделательной машины, поддержание постоянного вакуума в отсасывающих ящиках, эффективная система для отсасывания конденсата и т. д. уменьшают колебания нагрузки на двигатель, но полностью эти колебания ликвидированы быть не могут. Приходится добиваться, чтобы двигатель на них не реагировал. При этом предварительно необходимо свести к минимуму все другие причины, влияющие на колебания скорости двигателя: изменение напряжения генератора Леонарда, его скорости и т. д.

С подобными же условиями поддержания постоянства скорости, хотя и при менее жестких требованиях, приходится встречаться в многодвигательном приводе некоторых отбелочных установок в текстильной промышленности.

Из изложенного видно, что в рассматриваемом направлении практически могут ставиться две различных, хотя и близких одна к другой, задачи:

1) синхронизация хода двигателей как при пуске и торможении, так и при регулировании скорости, причем эта синхронизация должна быть выполнена при имеющей место неравномерности нагрузок в звеньях механизмов, приводимых отдельными двигателями;

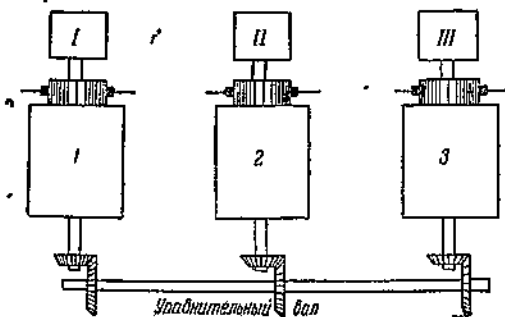
2) примерное поддержание постоянства скорости двигателей при отсутствии требования жесткой синхронизации. Эта последняя задача в зависимости от требуемой точности может быть достигнута или специальными совершенно плоскими характеристиками двигателей или применением автоматических регуляторов скорости.

Необходимо отметить, что при применении постоянного тока большинство приводов, в которых требуется поддержание постоянства скорости, питаются обычно по системе Леонарда.

116. Механическое выравнивание хода отдельных двигателей и особенности работы двигателей при этой связи

Механическая связь через уравнивательный вал (фиг. 302) была первой попыткой получения строгой синхронизации двигателей при многодвигательном приводе исполнительного механизма. В такой системе при всяком стремлении одного из двигателей отклониться от скорости другого или от скорости группы двигателей между последними возникает обмен энергией через уравнивательный вал. Последний, подвергаясь эластическому скручиванию, должен передавать от одного двигателя к другому мощность, соответствующую разности мощностей отдельных двигателей, на что и должен быть соответственно рассчитан. Подобная система

получения синхронности хода нескольких двигателей нашла применение лишь в отдельных очень старых установках. В них оказывалось целесообразным или по условиям упрощения конструкции производственного механизма или по условиям размещения электрооборудования на механизме заменить один двигатель несколькими меньшей мощности. Связь же отдельных звеньев через конструкцию механизма или специальную комбинацию передач заменялась связью через дополнительный вал.



Фиг. 302. Механические связи двигателей через уравнительный вал.

Однако такое решение могло находить применение лишь в старых установках и по сути дела противоречит основным современным тенденциям в приводе. Для удешевления производственных механизмов и уменьшения потерь в них мы стремимся удалить отдельные механические передачи, заменяя их электрической связью. Применение механического уравнительного вала противоречит самой идее многодвигательного привода, весьма часто предъявляющего требование о поддержании постоянства скорости или соотношения скоростей между отдельными элементами рабочей машины. Переходя на многодвигательный привод, мы упрощаем конструкцию производственной машины и избавляемся от значительных потерь в промежуточных передачах. В современных установках эта механическая связь обычно заменяется электрической, именуемой иногда „электрическим валом“. Механическая связь становится по существу неприемлемой тогда, когда по условиям производственного процесса нужно менять соотношение скоростей отдельных двигателей. В современных исполнительных механизмах это имеет место весьма часто.

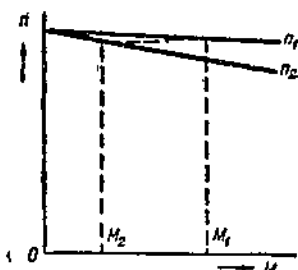
В свою очередь, как уже отмечали выше в п. 93, в отдельных случаях подъемно-транспортных устройств оказывается целесообразным приводить один исполнительный механизм двумя двигателями. Эти двигатели обычно одинаковой мощности оказываются жестко связанными через механические передачи и работают совместно на общий вал. Для таких условий работы нужно иметь в виду следующие обстоятельства. При совершенно одинаковых скоростных характеристиках двигателей последние, имея одинаковые скорости (скольжения), потребляют совершенно одинаковые мощности. В этом случае никаких затруднений при параллельной работе в жесткой связи возникнуть не может.

Однако, если, как это иногда бывает, скоростные характеристики двигателей неодинаковы, то потребляемая приводимым механизмом мощность не будет распределяться между двигателями

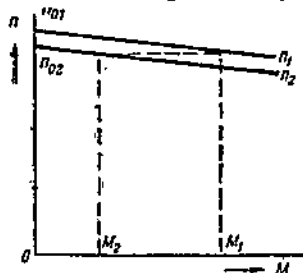
поровну или пропорционально их номинальным мощностям. Подобные условия легко могут повести к перегреву одного из двигателей. Рассмотрим случай шунтовых машин. Два совместно работающие на одном валу шунтовых двигателя постоянного тока связаны равенством напряжений на их зажимах и равенством числа оборотов в минуту. Очевидно, что напряжение сети

$$U = E_1 + I_1 R_1 = E_2 + I_2 R_2 = c' n \Phi_1 + I_1 R_1 = c' n \Phi_2 + I_2 R_2.$$

Равномерное распределение нагрузок между такими двумя машинами будет происходить лишь в том случае, если они будут иметь совершенно идентичные скоростные характеристики, т. е. если омическое падение напряжения и реакция якоря будут оказывать одинаковое влияние на скорость двигателей. Всякое смещение характеристики одного двигателя относительно характеристики другого будет вызывать, как видно из фиг. 303, неравно-



Фиг. 303. Распределение нагрузок между шунтовыми машинами при разных механических характеристиках.



Фиг. 304. Значение неравенства числа оборотов в минуту холостого хода шунтовых двигателей.

мерное распределение нагрузок между машинами. При нагрузке, составляющей, положим, 70% от суммарной мощности обоих двигателей, один двигатель может перегрузиться, другой недогрузиться. Двигатель с большим изменением скорости всегда будет недогружаться, с меньшим — перегружаться.

Нужно отметить, что скоростные характеристики двигателей одинаковой мощности одного и того же конструктивного типа могут вообще различаться вследствие неодинаковых между собой пространств, сопротивлений контактов щеток, соединительных проводов неодинаковой длины и т. д.

Это имеет особо важное значение, если в двигателях не совпадают числа оборотов в минуту холостого хода (фиг. 304). В этом случае иногда необходимо изменить передаточное число от одного из двигателей к рабочей машине.

Изменение числа оборотов одного из двигателей током возбуждения может оказаться невозможным, так как ослабление поля усиливает влияние реакции якоря в этом двигателе и может нарушить идентичность скоростных характеристик.

Если числа оборотов в минуту при холостом ходе двигателей одинаковы, но характеристики не идентичны, то подгонка их может быть обычно сделана или за счет изменения тока возбуждения или введения весьма малого сопротивления в цепь якоря. Иногда необходимо применение и того и другого способов.

Если на скоростную характеристику шунтовых двигателей постоянного тока оказывают влияние лишь омическое сопротивление якоря и реакция якоря, то в серийных и компаундных двигателях к этим факторам присоединяется еще влияние изменения потока при изменении нагрузки. В серийных двигателях вследствие большого изменения скорости с нагрузкой условия распределения нагрузки кажутся как будто более благоприятными, но, с другой стороны, здесь различие междужелезными пространствами может сильнее сказаться на характеристиках двигателей при разных скоростях. При предельной нагрузке двигателей и здесь могут быть осложнения из-за перегрева отдельного двигателя. Такие случаи, например, многократно имели место на двигателях ленинградского трамвая.

В ряде случаев взаимное выравнивание нагрузок двигателей достигается применением на них перекрещенных компаундных и противокомпаундных обмоток. При этом в цепь каждого двигателя может быть включена своя противокомпаундная обмотка и компаундная обмотка второго двигателя. Подробное рассмотрение вопросов выравнивания нагрузок двигателей подъемно-транспортных устройств можно найти в работе инж. Сергеева [Л. 153].

Условия совместной работы на одном валу асинхронных двигателей в установившемся режиме примерно аналогичны условиям работы шунтовых двигателей постоянного тока. Подгонка неидентичных характеристик возможна лишь в двигателях с кольцами с помощью добавочных сопротивлений в цепи ротора.

Изложенные выше соображения относятся к установившемуся режиму совместной работы двигателей. В периодах пуска и торможения тихоходных подъемных механизмов вопрос усложняется вследствие влияния на работу двигателей динамических моментов. В реальных схемах идентичность работы двигателей кроме неодинаковых характеристик и некоторого неравенства сопротивлений может нарушаться: 1) неодновременным растормаживанием и затормаживанием механических тормозов; 2) неодновременной работой реле и контакторов ускорения. Недоучет этих явлений приводил в ряде случаев к авариям. Для предупреждения последних должны быть тщательно продуманы кинематические связи двигателей и механизмов. Подробный анализ соответствующего вопроса дан инж. Копытовым [Л. 154].

117. Основные понятия о синхронной связи

Прежде чем рассматривать условия и способы синхронизации двигателей, коснемся основных определений соответствующих режимов.

Под синхронной связью электродвигателей или каких-либо органов, механически между собой не связанных, понимают такую, обычно электрическую, связь, которая обеспечивает совпадение во времени перемещения этих органов или их элементов. Эти перемещения могут быть в количественном отношении или одинаковыми или пропорциональными.

Синхронная связь отдельных механизмов или их частей может быть выполнена в зависимости от потребности или условий работы или в форме синхронной передачи угла или в форме системы синхронного вращения.

Синхронная передача угла представляет собой такую синхронную связь, в которой основное значение для синхронизируемых элементов имеет синфазность их положений в каждый момент времени, т. е. при этом задаваемое угловое перемещение должно быть получено с той или иной степенью точности, как при положении покоя после выполнения указанного перемещения, так и в процессе самого синхронного перемещения. При перемещении некоторая командная (ведущая) ось и ведомые оси должны находиться в синхронном движении. При этом должны быть выполнены следующие соотношения:

$$L = k_1 L_1 = k_2 L_2 = k_3 L_3 = \dots = k_n L_n, \quad (577)$$

$$\frac{dL}{dt} = k_1 \frac{dL_1}{dt} = k_2 \frac{dL_2}{dt} = k_3 \frac{dL_3}{dt} = \dots = k_n \frac{dL_n}{dt}, \quad (578)$$

$$\frac{d^2 L}{dt^2} = k_1 \frac{d^2 L_1}{dt^2} = k_2 \frac{d^2 L_2}{dt^2} = \dots = k_n \frac{d^2 L_n}{dt^2}, \quad (579)$$

где L — перемещение ведущего органа, а L_1, L_2, \dots, L_n — пропорциональные ему перемещения ведомых органов; k — коэффициенты пропорциональности.

Выполнение равенства (577) гарантирует синфазность положений связуемых органов после выполнения определенных перемещений, выполнение же равенств (578) и (579) определяет синхронность вращения и синхронность при ускорениях. Практически наиболее часто приходится сталкиваться с угловыми перемещениями связуемых органов α , при этом с заменой линейных перемещений L_n на углы α_n равенства (577), (578) и (579) остаются в силе.

Синхронное вращение отдельных осей представляет такую связь вращающихся осей, при которой обеспечивается строго определенная скорость для каждой из синхронизированных осей, находящихся в синхронном вращении. При этом числа оборотов в минуту синхронно вращающихся осей должны быть связаны следующими равенствами:

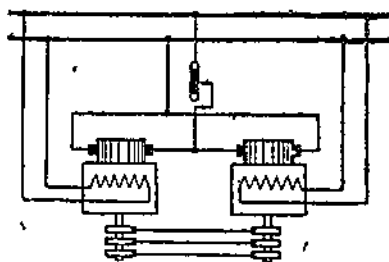
$$n = k_1 n_1 = k_2 n_2 = k_3 n_3 = \dots = k_n \cdot n_n, \quad (580)$$

$$\frac{dn}{dt} = k_1 \frac{dn_1}{dt} = k_2 \frac{dn_2}{dt} = \dots = k_n \frac{dn_n}{dt}, \quad (581)$$

Синхронизация вращения должна иметь место и при переменной скорости работы осей или механизмов. При синхронном вращении степень синфазности между осями в ряде случаев может быть значительно меньшей, чем в системах синхронной передачи угла. Обычно в промышленных установках ставится условие максимально допустимого расхождения осей на некоторый фиксированный угол. Кроме того здесь обычно все оси являются однозначными, и поэтому во многих случаях нельзя говорить о ведущих и ведомых осях. В данном курсе мы будем рассматривать лишь систему синхронного вращения. Синхронной передачи угла мы будем касаться лишь частично. Синхронная передача угла имеет большое значение для вопросов управления промышленными установками. Особо важное значение синхронная передача угла имеет для военных установок [Л. 4 и 13].

118. Синхронизация двигателей постоянного тока без вспомогательных машин.

В том случае, когда речь идет о синхронизации двигателей постоянного тока, процесс синхронизации может быть принципиально легко выполнен посредством использования якорных обмоток самих двигателей без добавочных уравнильных машин. Машина постоянного тока, снабженная контактными кольцами, которые присоединены к якорной обмотке, является со стороны переменного тока синхронной машиной.



Фиг. 305. Синхронизация машин постоянного тока по схеме Шенфера.

которые присоединены к якорной обмотке, является со стороны переменного тока синхронной машиной.

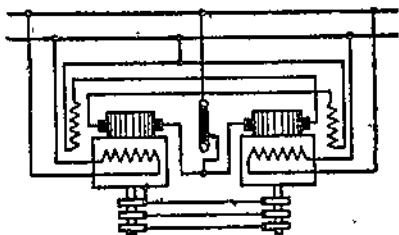
В случае необходимости синхронизировать работу двух или нескольких машин постоянного тока они снабжаются контактными кольцами, которые связываются между собой. Схема параллельного включения двух двигателей представлена на фиг. 305. Подобная схема была предложена акад. Шенфером.

В ней машины при определенной допустимой разности нагрузок идут всегда синхронно, так как со стороны переменного тока они работают как параллельно включенные синхронные машины. Всякое отклонение одной из машин на угол θ вызывает между машинами протекание уравнильного синхронизирующего тока, который выравнивает ход машины. Пуск параллельно включенных двигателей с помощью одного пускового реостата необходим для обеспечения синхронизации машин во время пуска.

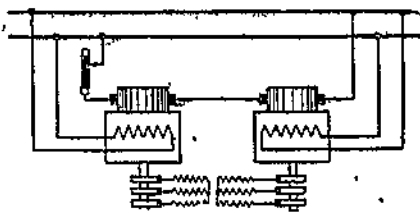
Для уменьшения выравнивающих токов Шенфером была разработана схема компаундных двигателей с перекрещенными последовательными обмотками (фиг. 306). Отличие этой схемы от

предыдущей заключается лишь в том, что двигатели, включенные параллельно, получают компаундные обмотки, питаемые главным током другого двигателя. Такая схема имеет тот плюс, что в случае увеличения момента сопротивления на валу одного из двигателей сила тока в нем увеличивается, а скорость его соответственно падает. Одновременно происходит снижение скорости второго двигателя за счет его компаундирования током первого. Тем самым условия синхронизации двигателей упрощаются.

Для того чтобы еще более облегчить синхронизацию двигателей и поставить последние по возможности в одинаковые условия, желательно их соединить последовательно. При этом прямая связь двигателей со стороны переменного тока через кольца оказывается неприемлемой, так как вследствие периодического соединения через щетки, кольца и провода мы имели бы непрерывные короткие замыкания в цепи постоянного тока. Для уничтожения этих коротких замыканий Шенфером было предложено включение между кольцами (фиг. 307) трансформатора с коэффи-



Фиг. 306. Схема синхронизации компаундных двигателей с перекрещенными обмотками.



Фиг. 307. Схема Шенфера для синхронизации при последовательном соединении двигателей.

циентом трансформации, равным единице. Условия синхронизации остаются теми же самыми, только электрическая связь двигателей постоянного тока через кольца превращается в индуктивную.

Подобные схемы синхронизации нашли, например, применение в некоторых трубопрокатных станах при провале верхнего и нижнего валков от отдельных двигателей.

Необходимость для осуществления синхронизации двигателей постоянного тока иметь специальные более дорогие машины с контактными кольцами повела к тому, что в ряде случаев практики предпочитают брать нормальные машины и синхронизировать их с помощью вспомогательных асинхронных машин.

119. Применение вспомогательных трехфазных и однофазных синхронных и асинхронных машин для синхронизации двигателей постоянного тока и асинхронных (системы с самосинами)

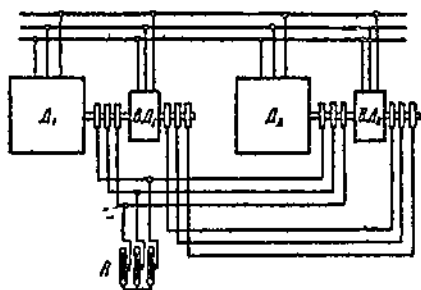
Синхронизация двигателей постоянного тока и асинхронных легко может быть выполнена с помощью вспомогательных машин. В качестве таковых могут быть использованы как синхрон-

ные, так и асинхронные машины. Так как синхронные машины конструктивно несколько сложнее асинхронных и требуют постоянного тока для возбуждения, то на практике для указанной выше цели они применяются в промышленности почти не нашли.

Практически вспомогательные машины оказываются не всегда нужными для применения их совместно с двигателями постоянного тока, так как последние, как видно из предыдущего, дают другие способы синхронизации.

В данном параграфе рассматривается синхронизация асинхронных двигателей с помощью вспомогательных асинхронных же машин.

Схема синхронизации хода двух асинхронных двигателей, приводящих в движение части какого-либо механизма, положим, крылья разводного пролета моста, представлена на фиг. 308. Для



Фиг. 308. Применение вспомогательных асинхронных машин для синхронизации асинхронных двигателей.

синхронизации приводных двигателей на вал каждого из них насажена вспомогательная асинхронная машина. В зависимости от возможной неравномерности нагрузок на каждый из главных двигателей мощность вспомогательных машин обычно бывает от 20 до 40% от мощности главных, доходя в отдельных случаях до 100%. Совершенно естественно, что применение вспомогательных машин удорожает электрический привод, как таковой, но в целом синхронизированный привод обыч-

но оказывается выгоднее и удобнее чисто механической связи с одним приводным двигателем, обеспечивая в то же время нужное предохранение конструкций от перекоса.

Вспомогательные асинхронные машины приключаются статорами к той же сети, что и главные. Роторы их соответствующими фазами связываются вместе. В случае вспомогательных синхронных машин очевидно их обмотки возбуждения было бы необходимо включить на цепь постоянного тока. Главные якорные обмотки их должны быть соединены между собой соответствующими фазами.

Вспомогательные машины вращаются главными синхронизованными схемой двигателями всегда с одинаковой скоростью, благодаря чему в их роторах индуктируются э. д. с. одной и той же частоты. Вращение вспомогательных асинхронных машин может быть как по полю, так и против поля. В случае строго синхронного хода главных двигателей э. д. с. роторов вспомогательных машин равны и сдвинуты по фазе ровно на 180°. Никакого уравнительного тока между машинами не возникает. В случае асинхронных машин последние потребляют из сети лишь намаг-

ничающий ток, работая так, как будто бы у них был разомкнутый ротор.

Если один из главных двигателей ускорится или замедлится, то фаза э. д. с. одной из машин изменится по отношению к фазе другой. В результате сдвига фаз между машинами потечет уравнивающий ток, совершенно так же, как при параллельной работе синхронных машин.

Рассмотрим сначала условия синхронизации при вспомогательных синхронных машинах. Всякое отклонение одной из машин от синхронного хода с другой будет вызывать смещение ротора вспомогательной синхронной машины на угол θ , в результате чего создается уравнивающий ток. Этот ток будет генераторным для одной вспомогательной машины и двигательным — для другой. Одна из этих машин, работая генератором, замедлит соответствующий главный двигатель; другая вспомогательная машина, работая двигателем, ускорит в свою очередь тот главный двигатель, с которым она сочленена. Вспомогательные машины будут держать агрегат строго в синхронизме так же, как синхронные турбогенераторы держат строго в синхронизме вращающие их паровые или гидравлические турбины.

Синхронизирующий момент синхронной машины

$$M_s = M_{\max} \sin \theta.$$

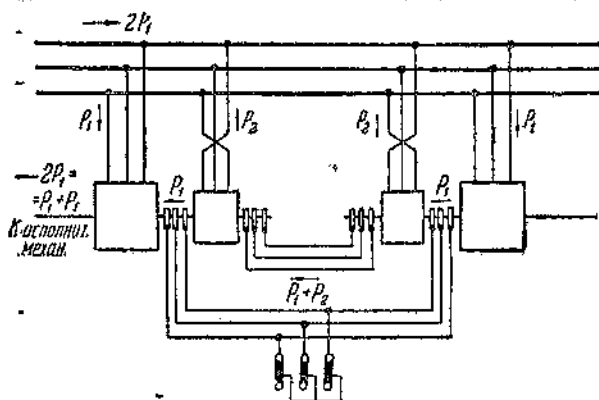
Величина синхронизирующего момента вспомогательных машин должна быть достаточна для того, чтобы держать главные двигатели в такте. Очевидно, что мощность вспомогательных машин всецело определяется возможной неравномерностью нагрузок главных двигателей. Если разность нагрузок главных двигателей вызовет смещение вращающихся частей вспомогательных машин на угол, больший 90° , и они будут не в состоянии держать главные двигатели в синхронизме, то агрегаты выйдут из синхронизма.

В случае вспомогательных асинхронных машин имеют место следующие явления. Получая со статора возбуждение переменным током, вспомогательные машины, будучи машинами двойного питания, будут вести себя как синхронные машины в случае мгновенного ускорения или замедления одной из них. Одна из машин будет работать генератором, получая энергию от связанного с ней главного двигателя, и затормозит последний. Другая машина будет работать двигателем, ускоряя соответствующий главный двигатель. В результате синхронность хода восстановится.

Как и в синхронных машинах, здесь может иметь место лишь мгновенное изменение скорости агрегатов в пределах угла θ , не превышающего примерно 90° , когда синхронизирующий момент достигает максимума. Если этот угол будет превзойден, то машины выйдут из синхронизма и перейдут на неустойчивый асинхронный режим. Чем больше неравномерность нагрузки главных двигателей, тем больше должен быть синхронизирующий момент, а следова-

тельно, и мощность вспомогательных машин. При недостаточной мощности последних они будут не в состоянии поддерживать синхронность хода главных двигателей.

На фиг. 309 показано распределение мощностей между отдельными главными и вспомогательными машинами при синхронизации.



Фиг. 309. Распределение мощностей между главными и вспомогательными двигателями при синхронизации.

Последние взяты вращающимися против поля. На фиг. 309 принято, что неравномерность в системе максимальна. Левый двигатель отдает производственному механизму мощность $2P_1$, правый — 0. При этом правая вспомогательная машина должна брать от сочлененного с ней двигателя мощность P_1 и передавать ее через соответствующую вспомогательную машину левому главному двигателю. Мощность каждой из вспомогательных машин

$$P = \frac{2P_1 - 0}{2} = P_1.$$

Если один двигатель имеет нагрузку $1,5P_1$, а другой — $0,5P_1$, то мощность каждой вспомогательной машины в этом случае будет

$$P = \frac{1,5P_1 - 0,5P_1}{2} = 0,5P_1.$$

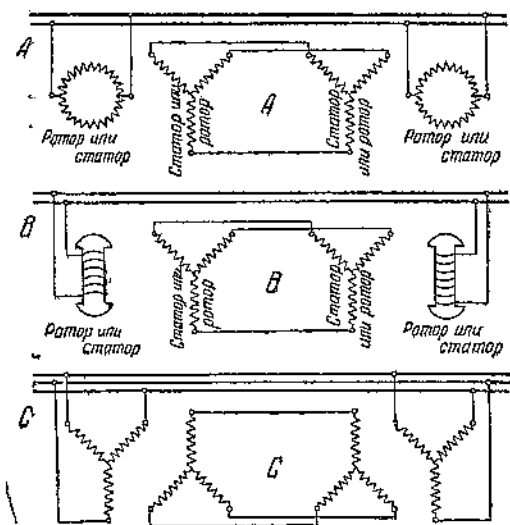
Таким образом мощность вспомогательной машины равна половине от избытка мощности одной главной машины над мощностью другой. Чаще всего и принимают мощность каждой из вспомогательных машин равной половине мощности главной.

Принципиально вспомогательные машины могут быть выполнены по одной из схем фиг. 310. Они могут иметь однофазный статор (или ротор) и трехфазный ротор (или статор) — в схеме А. При том же числе фаз, как и в схеме А, статор или ротор могут иметь явно выраженные полюса (схема В). И, наконец, как статор, так и ротор могут быть трехфазными (схема С), подобно тому как это было показано на схеме фиг. 309.

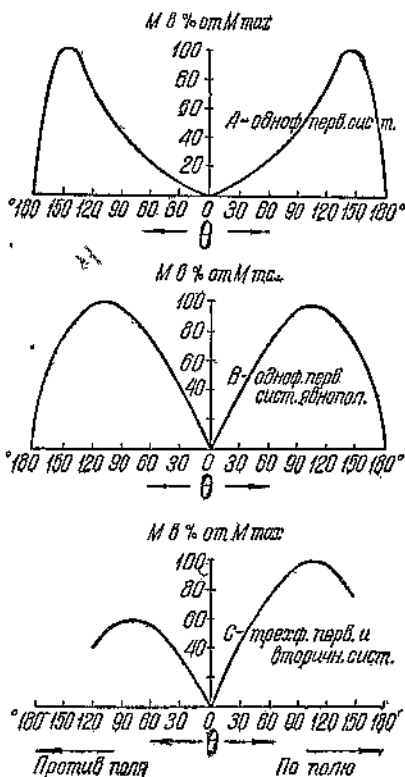
Каждая из трех приведенных схем имеет свои особенности в отношении изменения синхронизирующего момента в зависимости от угла θ , скорости и направления вращения (по полю или против поля). Синхронная связь приводных двигателей в промышленных установках осуществляется нормально с помощью машин

с трехфазной первичной и вторичной системами (схема С). Схемы А и В, известные под названием самосинхронизирующих систем — сокращенно самосинов («сельсинов» — от английского слова selfsynchronizing), используются в приводе лишь для регулировочных, контрольных и сигнализационных целей по причинам, которые будут изложены ниже.

На фиг. 311 представлены кривые изменения синхронизирующего момента при скорости $n=0$ для разных схем в зависимости от угла θ при повороте роторов как по полю, так и против поля. Как и следовало ожидать, однофазные системы (схемы А и В), как и имеющие вращающегося магнитного поля, а лишь пульсирующие, дают одинаковый характер кривой синхронизирующего момента при повороте как в одну,



Фиг. 310. Система синхронной связи с трехфазными и однофазными асинхронными машинами.



Фиг. 311. Кривые синхронизирующих моментов в покое для разных систем синхронной связи.

так и в другую сторону. При этом максимальный синхронизирующий момент получается в однофазной системе при угле θ , равном 140° для неявно выраженных полюсов и 110° — для явно выраженных.

Схема с трехфазной первичной и вторичной системами дает больший момент при вращении по полю, чем против поля, причем максимум момента при вращении по полю достигается при угле

$\theta=100^\circ$, при вращении против поля — при $\theta=90^\circ$. Все приведенные кривые зависимостей синхронизирующего момента M , от угла θ даны для случая неподвижных машин, т. е. в статическом состоянии, и являются более или менее типичными для большинства машин. Однако форма кривой может вообще несколько меняться в зависимости от мощности и конструкции машины, а также от величины введенных в цепь машин дополнительных активных и реактивных сопротивлений.

В дальнейшем ту асинхронную машину, которая в какой-то определенный момент времени нарушит абсолютный синхронизм, т. е. нарушит равенство $\theta=0$, мы будем для краткости называть передатчиком или просто датчиком, машину же, следующую за первой, — приемником. В случае однофазного возбуждения и отсутствия вращения вспомогательных машин вращающий момент приемника разнится от вращающего момента передатчика лишь на величину потерь при передаче энергии между машинами. Так как эти потери невелики, то при однофазном возбуждении можно с достаточным приближением считать, что синхронизирующий момент приемника равен приложенному к передатчику избыточному моменту одного из главных двигателей.



Фиг. 312. Зависимость момента от угла смещения роторов при трехфазном возбуждении.

Несколько иначе обстоит дело в случае чисто трехфазных систем. Кривые моментов передатчика и приемника для этого случая представлены на фиг. 312. Момент приемника

оказывается не равным моменту передатчика. Причины этого кроются в том, что если передатчик имеет момент, соответствующий вращению его по полю, то приемник получает момент, соответствующий вращению против поля. При направлении добавочного момента на передатчик в сторону поля (ускорение) момент приемника оказывается больше момента передатчика, при обратном направлении момента на передатчике — против поля — момент передатчика оказывается больше момента приемника.

Причины этого кроются в следующем. При абсолютном синхронизме покоя ($\theta=0$) э. д. с. роторов машины равны и совпадут по фазе. При сдвиге ротора одной из машин одна машина будет работать в режиме генератора, другая — в режиме двигателя. Генератором будет работать ротор той машины, э. д. с. которой будет опережать э. д. с. другой. Очевидно, что генераторный режим получится в машине, ротор которой будет сдвинут против поля. Эта машина возьмет мощность из сети, передаст ее на свой ротор и через ротор и статор второй машины (за вычетом потерь в обеих машинах) отдаст обратно в сеть. Пусть из сети в эту

машину 1 поступает мощность P_{s1} . Со статора на ротор передается мощность

$$P_{r1} = P_{s1} - m \cdot I_s^2 \cdot R_s$$

где $m \cdot I_s^2 \cdot R_s$ — потери в статоре первой машины. От первой машины к ротору второй машины 2 подводится мощность

$$P_{r2} = P_{r1} - m \cdot I_r^2 \cdot R_r$$

Далее с ротора на статор второй машины передается мощность

$$P_{s2} = P_{r2} - m \cdot I_s^2 \cdot R_r$$

В сеть возвращается мощность

$$P_r = P_{s2} - m \cdot I_s^2 \cdot R_s$$

Момент на валу первой машины будет

$$M_1 = \frac{P_{r1}}{\omega_0} = \frac{P_{s1} - m \cdot I_s^2 \cdot R_s}{\omega_0} \quad (582)$$

Момент на валу второй машины будет

$$M_2 = \frac{P_{r2}}{\omega_0} = \frac{P_{r1} - m \cdot I_r^2 \cdot R_r - 2m \cdot I_s^2 \cdot R_r}{\omega_0} < M_1 \quad (583)$$

Таким образом при трехфазных машинах момент машины, работающей генератором, всегда будет больше момента машины, работающей двигателем, независимо от того, какая из них будет передатчиком и какая приемником.

В однофазных машинах (в покое, с трехфазной вторичной цепью) вследствие различного изменения э. д. с. в разных фазах ротора подобные условия не имеют места, так как э. д. с. меняются лишь по величине, а не по фазе.

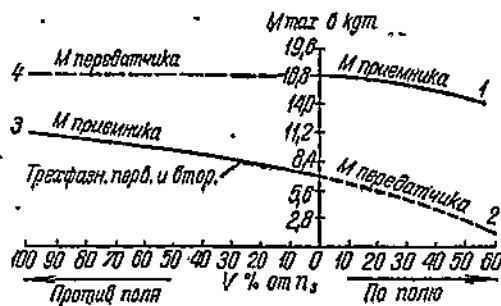
Как уже отмечено выше, приведенные характеристики моментов относятся к работе систем в покое (так называемый синхронный поворот или синхронная передача угла). Вращение асинхронных машин искажает форму кривых независимо от того, имеем ли мы дело с однофазной или трехфазной системой, вследствие изменения значимой э. д. с. Моменты передатчика и приемника оказываются неодинаковыми в случае вращения и при однофазной системе.

На фиг 313 представлена зависимость M приемника в процентах от скорости вращения для однофазной первичной системы. Изменение момента в зависимости от скорости в этом случае одинаково как при вращении в одну, так и в другую сторону.



Фиг. 313. Зависимость момента приемника от скорости при однофазном возбуждении.

Увеличение скорости машины вызывает снижение максимального момента. Особенно резкое снижение момента начинается от 66% синхронной скорости. При 100% синхронной скорости момент приемника становится равным нулю. Эти характеристики говорят о том, что однофазная система для синхронизации приводов мало пригодна. Она подходит лишь при ограниченных мощностях для передачи контрольных указаний, положим фиксации положения нажимных винтов прокатного стана. Сочленяя одну из машин с механизмом нажимного винта и устанавливая другую на пункте управления, мы, связав машины электрически, можем получать точное указание о положении валков в любой момент, так как поворот одной из машин будет сейчас же вызывать поворот второй,



Фиг. 314. Зависимость момента от скорости при вращении по полю и против поля в трехфазной системе.

4,85 кгт. В случае вращения по полю момент приемника достигает большего значения, чем момент передатчика. Однако величина этого момента является до некоторой степени условной и относится лишь к совершенно устойчивому состоянию нагрузки и скорости. Мгновенное изменение скорости главного двигателя из-за изменения нагрузки и, следовательно, изменение скорости передатчика заставляют приемник мгновенно же переходить на роль передатчика. Величина момента вместо того, чтобы иметь значение, соответствующее сплошной кривой 1 (фиг. 314), получает значения, соответствующие пунктирной кривой. Быстрота перехода с одного режима на другой определяется маховыми массами системы.

Ввиду того что при синхронизации двигателей любая из машин может работать как в качестве передатчика, так и приемника, практически при определении мощности вспомогательных машин приходится базироваться на нижней кривой.

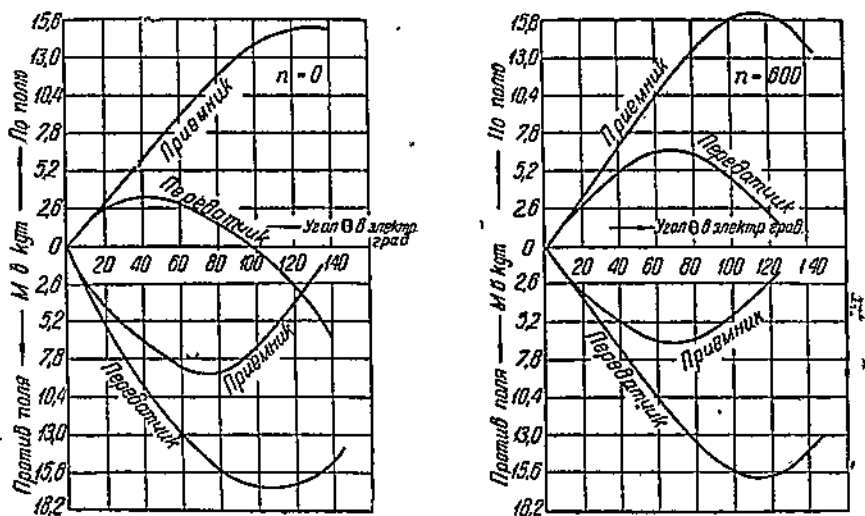
При этом чрезвычайно большое значение имеет идентичность электрических характеристик передатчика и приемника. Самоиндукция проводов между уравнительными машинами должна быть сведена к минимуму, так как она сильно уменьшает синхронизирующий момент.

установленной на пункте управления. Для таких контрольных целей однофазные системы дают большую устойчивость в работе, чем трехфазные.

На фиг. 314 представлено изменение момента в зависимости от скорости вращения для трехфазных систем при вращении по полю и против поля. Кривые относятся к двигателям мощностью в 5,6 kW, $2p=6$, с номинальным моментом в

При выборе направления вращения вспомогательных асинхронных машин по полю или против поля необходимо учитывать условия работы привода. Если привод неререверсивный, то следует выбирать вращение машин против поля, так как в этом случае при увеличении скорости имеем меньшее изменение момента приемника. Вместе с тем, здесь нет такой резкой разницы моментов приемника и передатчика при переходе с одного режима на другой, как при вращении по полю. Поэтому нормально следует рекомендовать вращение машин против поля.

В реверсивных приводах желательно при переходе с одного направления вращения на другое менять направления вращения поля и в вспомогательных машинах. В приводах с отрицательной нагрузкой (подъемный крановый двигатель — спуск груза) момент вспомогательных машин должен быть достаточным для синхронизации как при вращении против поля, так и по полю, ибо в установке может иметь место реверсирование главных двигателей без их переключения. При выборе мощностей вспомогательных двигателей необходимо точно учитывать влияние маховых масс на быстроту возврата системы к синхронной скорости. Величина маховых масс в этом переходном режиме играет огромную роль.



Фиг. 315. Зависимость максимальных моментов приемника и передатчика от угла смещения роторов при вращении по полю и против поля.

Практически при вращении по полю нельзя обычно переходить через скорость, равную половине синхронной скорости асинхронного вспомогательного двигателя из-за уменьшения синхронизирующего момента. При вращении против поля этих ограничений нет. Вращение по полю имеет плюс в отношении большего момента приемника и меньших потерь в роторе из-за малой

частоты. Поэтому практически часто комбинируют вращение по полю и против поля.

На фиг. 315 представлены для сравнения кривые моментов одного двигателя при вращении по полю и против поля при $n=0$ и при $n=600$ об/мин в зависимости от угла θ .

120. Синхронизация асинхронных двигателей путем электрической связи роторов через реостат

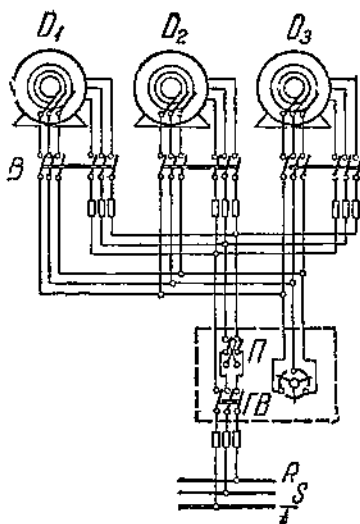
Применение вспомогательных асинхронных машин для синхронизации асинхронных двигателей сильно удорожает установку и кроме того увеличивает габариты электрооборудования и, следовательно, затрудняет его размещение. Поэтому в ряде установок применяется синхронизация асинхронных двигателей без вспомогательных машин.

В этом случае установка выполняется по схеме фиг. 316. Роторы двигателей имеют параллельное включение через реостат. Наличие последнего для синхронизации обязательно. При отсутствии реостата, параллельно приключенного к обмоткам роторов, а. д. с. роторов обеих машин будут направлены навстречу одна другой, никакого тока внутри роторов протекать не будет, и машины будут стоять.

Если же сопротивление реостата будет замкнуто, то цепь каждого двигателя будет связана в звезду, и каждый двигатель будет работать независимо от другого со своим собственным скольжением без всякой синхронизации. При наличии определенного сопротивления реостата на

Фиг. 316. Синхронизация асинхронных двигателей связью роторов через реостат.

пряжения на его зажимах от одной и другой машины (от обмоток роторов) при синхронном ходе для любой скорости должны быть совершенно одинаковы. Ток в регулировочном реостате будет суммироваться из тока двух двигателей. Заметим, что при одном и том же сопротивлении реостата в случае отдельной машины, как и при двух связанных машинах, одна машина идет со скольжением (грубо) в два раза меньшим, чем две машины. Это объясняется тем, что индуцированная в роторе э. д. с. в первом случае должна быть равна $E_{20} \cdot s = IR$, а во втором — $E_{20} \cdot s' = 2 \cdot I \cdot R$. При этом мы пренебрегаем влиянием активного и реактивного сопротивления самого ротора. Всякое отклонение одной из машин от синхронизма будет вызывать сдвиг ее напряжения на зажимах



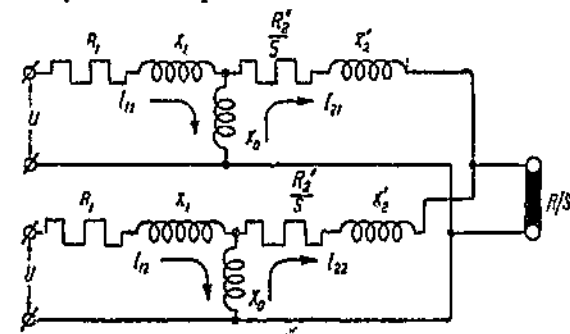
реостата по фазе от напряжения другого ротора. Неравенство этих напряжений вызовет между машинами уравнительный ток, аналогично тому как этот ток возникает между двумя специальными уравнительными машинами. Одна машина ускорится, другая замедлится, и синхронность их хода восстановится, несмотря на разницу в нагрузках.

Сдвиг одного из роторов относительно другого на угол θ будет тем меньше, чем больше скольжение двигателей. При большем скольжении может быть допущена большая разность в нагрузках. Причины этого кроются в том, что синхронизирующий момент зависит от напряжения роторов, а последнее тем больше, чем больше скольжение. Обычно для обеспечения синхронизма при рывности моментов в 10—15% необходимо скольжение в 20—25%. При номинальных скольжениях допустимая разность нагрузок невелика. Она тем больше, чем выше скольжение.

Это как раз подходит для практических целей в некоторых крановых установках, где наибольший перекося конструкций возможен именно во время пускового периода, т. е. в период больших скольжений. Существенное значение для синхронного хода двигателей имеет величина реактивного сопротивления ротора. Увеличение его до некоторого предела влечет за собой повышение устойчивости работы. При скольжении меньше 20% синхронная работа двигателей становится ненадежной.

Рассмотрение основ расчета условий синхронизации для однофазных и трехфазных систем в полном объеме выходит за пределы данного курса [Л. 4, 13, 193—202]. Мы здесь ограничимся кратким изложением аналитических основ расчета в той форме, в какой это дано ниже Садовским. При этом разберем случаи:

- 1) связи двух синхронизируемых асинхронных двигателей через роторный реостат;
- 2) связи двух двигателей без реостата, случай, имеющий место при применении вспомогательных асинхронных машин;
- 3) общей связи n вспомогательных асинхронных машин.



Фиг. 317. Эквивалентная схема для связи асинхронных двигателей через реостат.

1. Случай связи роторов машин через пускорегулировочный реостат при двух двигателях одинаковой мощности. Эквивалентная схема для этого случая представлена на фиг. 317. Напишем сначала уравнения напряжений для цепей статоров и роторов обоих двигателей при синхронном ходе, исходя из тех соображений, что ротор первого двигателя опережает ротор второго. При этом введем следующие обозначения. Все величины отнесены к одной фазе и приведены к виткам статора.

U — напряжение сети;

I_{11} и I_{12} — соответственно токи статоров первого и второго двигателей;

I_{21} и I_{22} — токи роторов первого и второго двигателей;

R_1 и x_1 — омическое и реактивное сопротивления обмотки статора;
 R_2 и x_2 — омическое и реактивное сопротивления обмотки ротора;
 x_0 — реактивное сопротивление полезного потока;
 τ_1 и τ_2 — коэффициенты рассеяния;
 R — общее внешнее сопротивление.
 Для статорных цепей можно написать:

$$\dot{U} = \dot{I}_{11} z_1 - \dot{I}_{21} \cdot j x_0, \quad (584)$$

$$\dot{U} = \dot{I}_{12} \cdot z_1 - \dot{I}_{22} \cdot j x_0. \quad (585)$$

В свою очередь для роторных цепей будут иметь место следующие равенства:

$$\dot{I}_{21} \left(z_2 + \frac{R_2}{s} \right) + \dot{I}_{22} \frac{R}{s} \cdot e^{j\theta} = \dot{I}_{11} j \cdot x_0, \quad (586)$$

$$\dot{I}_{22} \left(z_2 + \frac{R_2}{s} \right) + \dot{I}_{21} \frac{R}{s} e^{-j\theta} = \dot{I}_{12} \cdot x_0, \quad (587)$$

где θ — угол сдвига роторов двигателей в электрических градусах. Знак в показателе степени при e зависит от того, отстаёт ли ротор этого двигателя от ротора другого или опережает его. В первом случае в равенстве нужно брать ($e^{j\theta}$), во втором ($e^{-j\theta}$).

В этих равенствах:

$$z_1 = R_1 + j(x_1 + x_0) = R_1 + jx_0(1 + \tau_1), \quad (588)$$

$$z_2 = \frac{R_2}{s} + j(x_2 + x_0) = \frac{R_2}{s} + jx_0(1 + \tau_2). \quad (589)$$

Решая равенства (584)–(587), имеем:

$$\dot{I}_{11, 12} = \frac{x_0^2 \left[z_2 + \frac{R}{s} (1 + e^{\pm j\theta}) \right] + z_1 z_2 \left(z_2 + 2 \cdot \frac{R}{s} \right)}{\left[x_0^2 + z_1 \left(z_2 + 2 \cdot \frac{R}{s} \right) \right] \left(x_0^2 + z_1 \cdot z_2 \right)} \cdot U, \quad (590)$$

$$\dot{I}_{21, 22} = \frac{j x_0 \left\{ x_0^2 + z_1 \left[z_2 + \frac{R}{s} (1 - e^{\pm j\theta}) \right] \right\}}{\left[x_0^2 + z_1 \left(z_2 + 2 \cdot \frac{R}{s} \right) \right] \left(x_0^2 + z_1 z_2 \right)} \cdot \dot{U}. \quad (591)$$

Индексы I_{11} и I_{12} и I_{21} и I_{22} находятся в соответствии со знаками при $e^{\pm j\theta}$, т. е. левому индексу соответствует верхний знак.

При $\theta = 0$ вторичный ток

$$\dot{I}_{21} = \dot{I}_{22} = \dot{I}_2^0 = \frac{j x_0}{x_0^2 + z_1 \left(z_2 + 2 \cdot \frac{R}{s} \right)} \cdot \dot{U}. \quad (592)$$

Очевидно, что он равен вторичному току при работе одного двигателя со скольжением s и вторичным внешним сопротивлением $2R$.

При $\theta = 180^\circ$ вторичный ток

$$\dot{i}_{21} = \dot{i}_{22} = \dot{i}_2 = \frac{jx_0}{x_0^2 + z_1 z_2} \cdot \dot{U}. \quad (593)$$

Он равен вторичному току при работе одного двигателя со скольжением s при роторной обмотке, замкнутой накоротко. Подставляя полученные значения \dot{i}_2 и \dot{i}_2^0 в общие выражения для \dot{i}_{21} и \dot{i}_{22} , находим:

$$\dot{i}_{21} = \dot{i}_2 = \frac{\dot{i}_2 - \dot{i}_2^0}{2} (1 + e + j\theta). \quad (594)$$

$$\dot{i}_{22} = \dot{i}_2 = \frac{\dot{i}_2 - \dot{i}_2^0}{2} (1 + e - j\theta). \quad (595)$$

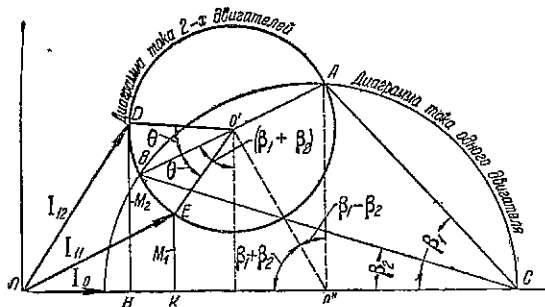
При этом первичные токи могут быть выражены, как

$$\dot{i}_{11} = \dot{i}_0 + \dot{i}_{21} \frac{jx_0}{z_1}, \quad (596)$$

$$\dot{i}_{12} = \dot{i}_0 + \dot{i}_{22} \frac{jx_0}{z_1}. \quad (597)$$

Равенства (594) и (595) дают возможность построить круговую диаграмму. Она представлена на фиг. 318. На ней круговая диаграмма одного двигателя показана более тонкой линией, для двух двигателей — более толстой.

В целях упрощения положим, что $R_1 = 0$. Такое допущение практически мало повлияет на результат. В этих условиях при изменении угла θ конец вектора тока любого двигателя описывает окружность, вычерченную толстой линией. Точки A и B соответствуют токам \dot{i}_2 и \dot{i}_2^0 .



Фиг. 318. Круговые диаграммы тока для одного и двух двигателей.

Момент двигателя определяется непосредственно ординатой конца вектора соответствующего тока. Если точки A и B характеризовать углами, составленными линиями CA и CB с осью абсцисс β_1 и β_2 , то моменты двигателей можно выразить следующим образом при максимальном моменте двигателя M_{\max} , равном радиусу окружности тока:

$$M_{12} = M_{\max} [\cos(\beta_1 - \beta_2) \sin(\beta_1 + \beta_2) - \sin(\beta_1 - \beta_2) \cos(\beta_1 + \beta_2 \mp \theta)]. \quad (598)$$

Величины углов β_1 и β_2 могут быть определены по скольжению:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{s}{s_m}; \quad \operatorname{tg} \beta_2 = \frac{s}{s_m} + \frac{R_2}{R_2 + 2R} \cdot s'_m. \quad (599)$$

При этом s_m — опрокидывающее скольжение при работе одного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора, и s'_m — то же скольжение при добавочном сопротивлении $2R$. Величина s_m , как известно, равняется

$$s_m = \frac{R_2(1 + \tau_1)}{x_1 + x_2(1 + \tau_1)}$$

Система рассматриваемого синхронного вала работает устойчиво до тех пор, пока момент второго двигателя не достигнет максимума при угле $\theta = \pi - \beta_1 - \beta_2$.

Подставляя значения β_1 и β_2 из (599) в (598), получаем

$$M_{12} = M_{\max} \left[\frac{1 - \cos \theta}{\frac{s}{s_m} + \frac{s'_m}{s}} + \frac{[1 + \cos \theta]}{\frac{s}{s'_m} + \frac{s'_m}{s}} \mp \frac{\sin \alpha \left(\frac{s'_m}{s_m} - \frac{s_m}{s'_m} \right)}{\left(\frac{s}{s_m} + \frac{s'_m}{s} \right) \left(\frac{s}{s'_m} + \frac{s'_m}{s} \right)} \right] \quad (600)$$

Соответствующие зависимости $\frac{M_1}{M_{\max}}$ и $\frac{M_2}{M_{\max}}$ от θ даны на фиг. 319а для

разных отношений $\frac{s}{s_m}$ и $\frac{R}{R_2}$. Заметим, что при больших значениях $\frac{R}{R_2}$ момент первого двигателя становится равным нулю, и двигатель может даже переходить в генераторный режим.

Разность моментов, которые развиваются двигателями, будет

$$M_2 - M_1 = 2M_{\max} \cdot \frac{\sin \theta \left(\frac{s'_m}{s_m} - \frac{s_m}{s'_m} \right)}{\left(\frac{s}{s_m} + \frac{s'_m}{s} \right) \left(\frac{s}{s'_m} + \frac{s'_m}{s} \right)} \quad (601)$$

Наибольшая допустимая разность моментов определяется из условия $\theta = \beta_1 + \beta_2$. Подставляя это равенство, а также значения β из 599 в 601 для этого условия, получим

$$\frac{M_2 - M_1}{2} = M_{\max} \cdot \frac{\left(\frac{s'_m}{s_m} - \frac{s_m}{s'_m} \right) \left(\frac{s}{s_m} + \frac{s'_m}{s} \right)}{\left(\frac{s}{s_m} + \frac{s'_m}{s} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{s}{s_m} + \frac{s'_m}{s} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{s}{s'_m} + \frac{s'_m}{s} \right)^{3/2}} \quad (602)$$

Соответствующие кривые в зависимости от $\frac{s}{s_m}$ показаны на фиг. 319б.

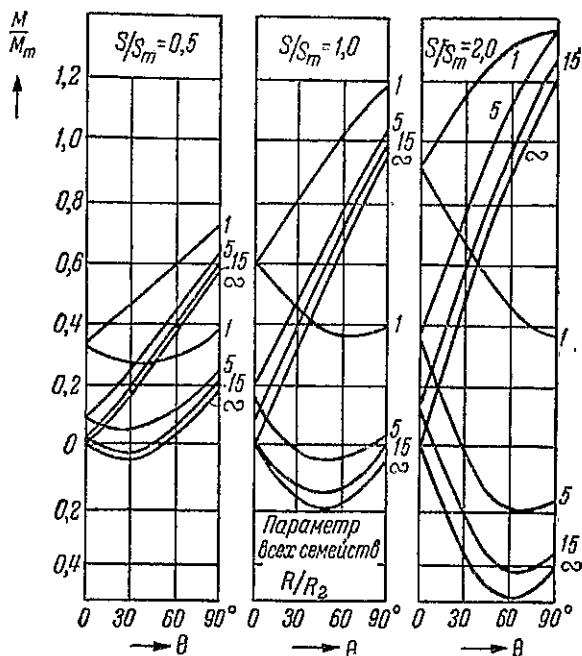
2. Случай вспомогательных асинхронных машин. Этот случай является частным случаем предыдущей схемы при $R = \infty$. При $R = \infty$, $s'_m = \infty$ и $I'_2 = 0$. Подставляя эти значения в формулы для токов I_{11} , I_{12} , I_{21} , I_{22} (591)–(595), получим:

$$\dot{I}_{11, 12} = \frac{2z_1 z_2 + x_0^2 (1 + e^{\pm j\theta})}{2z_1 (z_1 \cdot z_2 + x_0^2)} \cdot \dot{U} \quad (603)$$

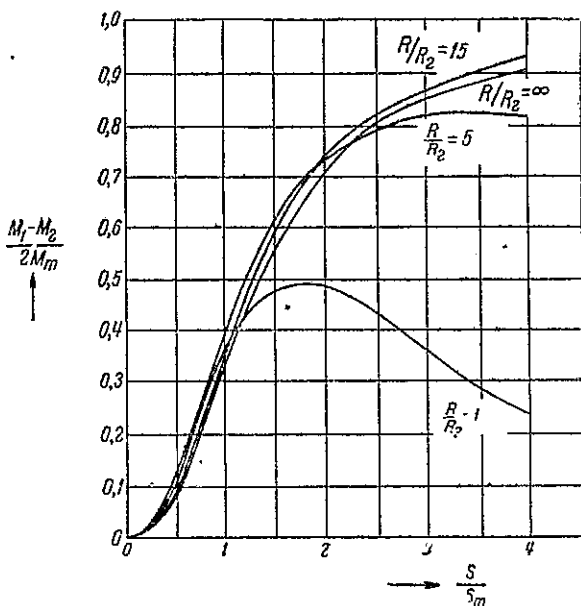
$$\dot{I}_{21, 22} = \frac{jx_0 (1 - e^{\pm j\theta})}{2(z_1 \cdot z_2 + x_0^2)} \cdot \dot{U} \quad (604)$$

или

$$\dot{I}_{21, 22} = \frac{I_2}{2} (1 + e^{\pm j\theta}) \quad (605)$$



Фиг. 319а. Зависимости отношений моментов от угла θ .

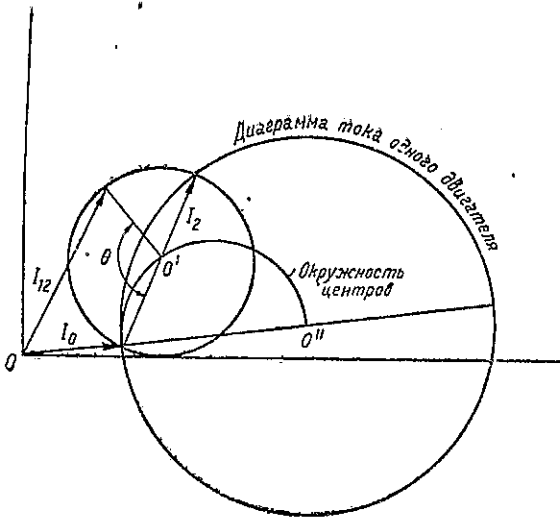


Фиг. 319б. Зависимость $\frac{M_1 - M_2}{2M_m}$ от $\frac{s}{s_m}$ при разных соотношениях сопротивлений.

Круговая диаграмма для этого случая представлена на фиг. 320, при этом первая машина работает все время генератором, вторая машина — все время двигателем. При разных скольжениях центр окружности для двух двигателей перемещается по окружности центров с диаметром, равным радиусу окружности тока одного двигателя.

Для этого случая при $s'_m = \infty$

$$M_{12} = M_{\max} \cdot \frac{1 - \cos \theta \mp \sin \theta \cdot \frac{s}{s_m}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (606)$$



Фиг. 320. Круговая диаграмма для вспомогательных асинхронных машин.

Предел устойчивости работы наступает при условии

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{s}{s_m} \quad (607)$$

Предельные значения моментов двигателей равны

$$(M_{12})_{\max} = \frac{1 \mp \sqrt{1 + \left(\frac{s}{s_m}\right)^2}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (608)$$

Соответствующие кривые в зависимости от угла представлены на фиг. 321. Интересно отметить, что формула (606), как то отмечает Садовский, является более общим случаем упрощенной формулы Клосса и переходит в последнюю при $\theta = 180^\circ$.

3. Случай нескольких двигателей. Рассмотрим общий случай связи n вспомогательных машин, участвующих в синхронном вале. Эквивалентная схема i -той машины представлена на фиг. 322.

Уравнение напряжения для статорной обмотки любой машины будет иметь вид:

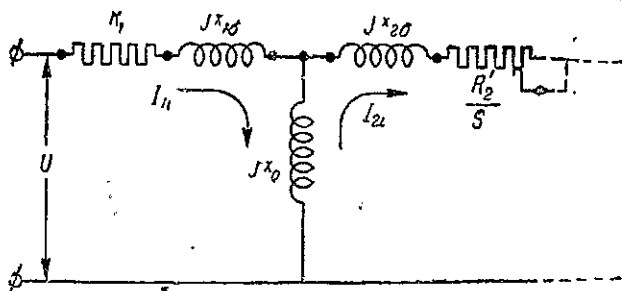
$$\dot{U} = \dot{I}_{1i}z_1 - \dot{I}_{2i}jx_0. \quad (609)$$

Всего таких уравнений будет n .

Для цепей роторов необходимо составить ряд уравнений напряжений, беря 1-ю машину с n -ной, 2-ю с n -ной и т. д. Напряжения на вторичных зажимах роторов машин могут быть приравнены одно другому лишь после умножения каждого из них на угол $e^{j\theta_i}$, где θ_i есть угол сдвига ротора i -той машины относительно некой воображаемой оси, вращающейся вместе с установкой. Необходимость умножения вызвана тем, что роторы всех машин вследствие нагрузки сдвинуты на некоторый угол друг относительно друга.

Таким образом:

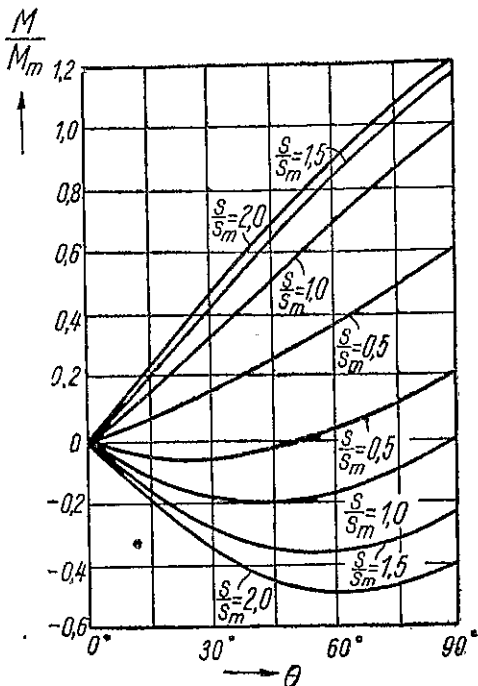
$$(\dot{I}_{1i}jx_0 - \dot{I}_{2i}z_2) \cdot e^{j\theta_i} = (\dot{I}_{1n}jx_0 - \dot{I}_{2n}z_2) e^{j\theta_n}. \quad (610)$$



Фиг. 322. Эквивалентная схема i -той машины.

Придавая индексу i все значения от 1 до $(n-1)$, получим $(n-1)$ уравнений относительно токов \dot{I}_{1i} и \dot{I}_{2i} . Всего таким образом получается $(2n-1)$ уравнений при $2n$ неизвестных. Последнее $2n$ -ое уравнение получается из условия равновесия токов

$$\sum_{i=1}^{i=n} \dot{I}_{2i} = 0. \quad (611)$$



Фиг. 321. Зависимость отношений моментов от угла θ .

Решая указанные системы уравнений, получаем выражения для токов:

$$\dot{I}_{2i} = \frac{\dot{U}}{n} \cdot \frac{i x_0 \left[n - \sum_{i=1}^{i=n} e^{j(\theta_n - \theta_i)} \right]}{z_1 \cdot z_2 + x_0^2} \quad (612)$$

Соответственно

$$\dot{I}_{1i} = \frac{\dot{U}}{n} \cdot \frac{n \cdot z_1 z_2 + x_0^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} e^{j(\theta_n - \theta_i)}}{z_1 (z_1 \cdot z_2 + x_0^2)} \quad (613)$$

Положим $R_1 = 0$ и воспользуемся формулой¹

$$M_i = u \cdot \frac{\dot{I}_{1i} + \dot{I}'_{1i}}{2}, \quad (614)$$

где \dot{I}'_{1i} — комплекс, сопряженный с \dot{I}_{1i} .

Подставляем в (614) величины z_1 , z_2 , \dot{I}_{1i} и \dot{I}'_{1i} , получим

$$M_i = \frac{U^2}{n \sigma_1} \cdot \frac{\left[n - \sum_{i=1}^{i=n} \cos(\theta_n - \theta_i) \right] \frac{R_2}{s} \cdot \sigma_1 + (x_1 + x_2 \sigma_1) \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \sin(\theta_n - \theta_i)}{[x_1 + x_2 \sigma_1]^2 + \left[\frac{R_2}{s} \cdot \sigma_1 \right]^2}, \quad (615)$$

где $\sigma_1 = \frac{x_0 + x_1}{x_0}$ представляет коэффициент рассеяния Гопкинсона.

Пользуясь обычными для асинхронных двигателей выражениями

$$M_{\max} = \frac{U^2}{2\sigma_1(x_1 + x_2 \sigma_1)}; \quad s_m = \frac{R_2 \cdot \sigma_1}{x_1 + x_2 \sigma_1} \quad (616)$$

и подставляя в выражение для M_i , получаем момент для любой машины:

$$M_i = \frac{\frac{2}{s} \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \cdot \left[n - \sum_{i=1}^{i=n} \cos(\theta_n - \theta_i) - \frac{s}{s_m} \sum_{i=1}^{i=n} \sin(\theta_n - \theta_i) \right]. \quad (617)$$

В том случае, когда из всех n машин $(n-1)$ нагружены одинаково, т. е. при $\theta_n = 0$, $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \dots = \theta_{n-1} = \theta$, получим:

¹ См. статью Садовского, „Вестник электропромышленности“ № 3, 1938, стр 36.

$$M_n = \frac{\frac{2}{n} M_{\max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \cdot (n-1) \left[1 - \cos \theta - \frac{s}{s_m} \sin \theta \right] \quad (618)$$

и

$$M_l = \frac{\frac{2}{n} M_{\max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \left[1 - \cos \theta + \frac{s}{s_m} \sin \theta \right] \quad (619)$$

Как видно из сравнения равенств (618)—(619) для $l=1, 2, 3 \dots (n-1)$ (606), формулы для двух двигателей являются частным случаем совместной синхронной работы n машин.

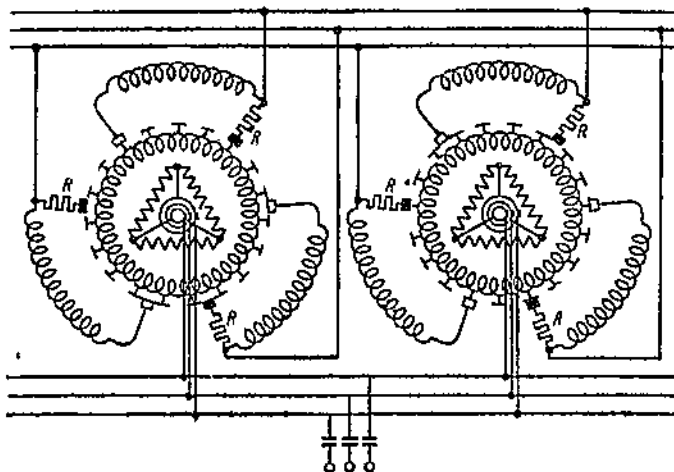
121. О синхронизации шунтовых коллекторных двигателей переменного тока типа Шраге

Для некоторых многодвигательных приводов с коллекторными двигателями типа Шраге, преимущественно в полиграфической и бумажной промышленности, также возникает вопрос о необходимости их синхронизации. Так, на бумажной фабрике в Ситтингборне (Англия) синхронизация ряда коллекторных двигателей мощностью 150—200 kW, установленных на бумагоделательной машине, осуществлена с помощью вспомогательных синхронных машин, в некоторых других установках применены вспомогательные асинхронные машины. У нас в СССР вопрос возник практически применительно к многодвигательному электроприводу 21-рольной ротационной машины типографии «Известий». Суммарная мощность всех двигателей, намеченных к установке на этой машине, равна 2000 kW при мощности отдельных коллекторных двигателей примерно 100 kW.

Каждая секция ротационной машины состоит из ролевых устройств, удерживающих роли с бумагой в нужном положении и подгормаживающих их при разматывании, печатных аппаратов, красочных аппаратов и фальцаппаратов, где бумажная лента разрезается на отдельные листы, складывается и уже в виде готовых газет поступает на транспорт. Каждая секция приводится одним двигателем. Нормально при печатании четырехстраничной газеты на один печатающий аппарат приходится один фальцаппарат, при печатании 16-страничной газеты на один фальцаппарат работает четыре роля и четыре печатных аппарата. При такой совместной работе нескольких секций на один фальцаппарат возникает необходимость согласованного вращения секций, так как при этом не должно быть набегания или обрыва бумаги, места перегибов и разрезов должны получаться только в соответствии с оттисками. Вопрос усложняется исключительной быстротой работы — до $2 \cdot 10^5$ восьмистраничных газет в час при скорости движения бумажной ленты до 660 м/мин,

В установке типографии «Известий» было предположено применить синхронизацию двигателей Шраге по схеме фиг. 323.

Синхронизация здесь достигается также электрической связью вторичных обмоток, как и в асинхронных двигателях. Схема такой



Фиг. 323. Схема синхронизации двигателей Шраге.

синхронизации была предложена инж. Дартау (ЛПИ). Детально схема исследована теоретически и экспериментально инж. Лернером [Л. 203—205]. Испытание этой схемы в лаборатории МЭИ, а также непосредственно на Рыбинском заводе, изготовляющем ротационные машины, дало хорошие результаты.

122. Основные способы поддержания постоянства скорости двигателей при многодвигательном приводе

В целом ряде многодвигательных электроприводов (нереверсивные регулируемые станы, бумагоделательные машины, конвейеры резиновой промышленности и т. п.) строгой синхронизации вращения отдельных электроприводов не требуется. Производство вполне удовлетворяется поддержанием примерного постоянства скорости с точностью до 1% для прокатных станов, до 0,1%—для бумагоделательных машин. При этом скорость отдельных двигателей должна поддерживаться постоянной, независимо от имеющих место мгновенных изменений нагрузки. В таких приводах синхронизация в большинстве случаев оказывается просто непригодной, так как по условиям производства в отдельные периоды должно меняться соотношение скорости отдельных двигателей, приводящих различные секции исполнительного механизма. Если бы в таких случаях находили применение асинхронные двигатели, то поддержание скорости их пришлось бы производить непрерывным автоматическим регулированием сопротивления в цепи ротора под

влиянием тех или иных реле или других автоматических аппаратов. В коллекторных двигателях переменного тока та же цель может достигаться автоматически управляемым перемещением щеток по коллектору.

Однако чаще всего в таких электроприводах, в особенности в нашей практике, применяются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением. Наиболее удобно в этих двигателях достигать постоянства скорости при различных нагрузках соответствующим изменением магнитного потока, т. е. тока возбуждения. Это воздействие может быть получено разными способами, описываемыми ниже. Оно должно быть весьма быстрым и по возможности мгновенно должно ликвидировать всякое отклонение двигателя от фиксированной при установке процесса скорости.

Американскими фирмами для неререверсивных прокатных станков были построены регулируемые двигатели постоянного тока с пределами регулирования 1:2, мощностью 1 870 kW, в которых необходимое постоянство скорости с точностью в 0,2—1,4% при изменении нагрузки от 0 до $2M_N$ достигалось простым противокомпаундированием двигателя.

В середине 1928 г. одна фирма Westinghouse установила 48 подобных двигателей с суммарной мощностью в 45 000 kW на 11 непрерывных станах.

Однако, если учитывать динамическое падение скорости (п. 65) и ряд других факторов, то подобные двигатели все-таки не могут удовлетворить промышленность во всех случаях, где требуется поддержание постоянства скорости. Так, подобные двигатели не могут дать нужной точности для процесса бумагоделательных машин. Нужно иметь вообще в виду, что в подобных схемах точность поддержания постоянства скорости при разных скоростях остается неодинаковой в силу условий насыщения. Так, двигатель GEC в 930 kW, 600 V, 175/350 об/мин при колебании нагрузки от 0 до $2M_N$ имеет изменение скорости 1,41% для верхней скорости и в 1,02% — для нижней. Поэтому приходится прибегать к специальным способам автоматической регулировки.

Мы рассмотрим в дальнейшем применение для этой цели: а) быстродействующих электромагнитных регуляторов; б) механических и электрических дифференциалов; в) самосинов с угольным регулятором; г) ионно-электронных аппаратов, частично амплидинов.

123. Некоторые особенности системы Леонарда при широком диапазоне регулировки скорости с использованием подрегулировки скорости двигателя током возбуждения

Большинство электродвигателей, в которых требуется поддержание постоянства скорости, питаются по системе Леонарда от одного генератора и при широком диапазоне регулировки (например, в бумагоделательных машинах до 1:12) должны подрегулироваться собственным током возбуждения (отдельные двигатели).

Эта подрегулировка нужна: 1) для изменения соотношения скоростей отдельных секционных двигателей; 2) для поддержания постоянства скорости тех же двигателей.

При имеющемся на валу исполнительного механизма статическом моменте уменьшение тока возбуждения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением должно повлечь за собой увеличение тока в якоре, ибо $M_m = M_d = c \cdot I \cdot \Phi$. Но увеличение тока в якоре вызывает повышение падения напряжения, что ведет к понижению скорости двигателя. Это явление становится существенным при малых напряжениях на зажимах двигателя (например, при $0,1 U_N$) и может повести в этих случаях к опрокидыванию момента двигателя. Последний может оказаться не в состоянии развить необходимую величину момента. Повышение тока в якоре может оказаться не в состоянии скомпенсировать уменьшение потока. Момент двигателя может оказаться недостаточным для вращения исполнительного механизма. При больших напряжениях на зажимах двигателя это обстоятельство особой роли не играет, при малых напряжениях в таких электроприводах требуется обязательная проверка достаточности момента двигателя при разных, в особенности низких, скоростях. Наибольшее практическое значение этот вопрос имеет для бумагоделательных машин.

Выведем зависимость для момента двигателя в рассматриваемых условиях. Обозначим соответственно через n_{0N} и n_N — число оборотов в минуту идеального холостого хода и номинальное при наибольшем напряжении в системе Леонарда U_N , через n_{0k} и n_k — те же величины при пониженном напряжении генератора U_{Nk} . При этом

$$n_{0N} = \frac{U_N}{c \cdot \Phi_N}; \quad n_{0k} = \frac{U_{Nk}}{c \cdot \Phi_N}. \quad (620)$$

Соответственно

$$n_N = \frac{U_N - I_N \cdot R}{c \cdot \Phi_N}; \quad n_k = \frac{U_{Nk} - I_N \cdot R}{c \cdot \Phi_N}. \quad (621)$$

Положим, что с помощью регулировки тока возбуждения двигателя на k -той ступени напряжения генератора нами при $M_m = M_N$ и при напряжении генератора U_{Nk} достигнута скорость n_{0k} . Тогда

$$n_{0k} = \frac{U_{Nk}}{c \cdot \Phi_N} = \frac{U_{Nk} - IR}{c \cdot \Phi_k}, \quad (622)$$

где Φ_k — уменьшенное значение потока двигателя, а I — новая сила тока при том же статическом моменте, очевидно, большая, чем I_N .

Отсюда

$$\Phi_k = \Phi_N \left(1 - \frac{IR}{U_{Nk}} \right). \quad (623)$$

Момент, развиваемый двигателем, выразится при этом равенством

$$M = c \cdot I \cdot \Phi_k = c \cdot I \cdot \Phi_N \left(1 - \frac{IR}{U_{Nk}}\right). \quad (624)$$

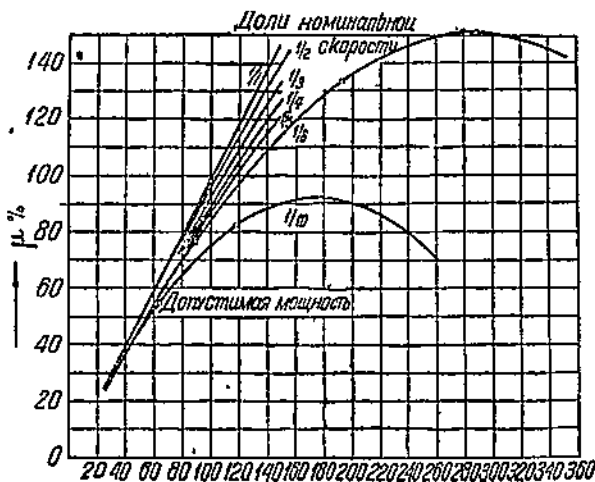
Полученное выражение в зависимости от тока имеет максимум. Найдем его, взяв производную $\frac{dM}{dI}$ и приравняв ее нулю,

$$\frac{dM}{dI} = c \cdot \Phi_N - 2 \cdot \frac{c \cdot I \cdot R}{U_{Nk}} \cdot \Phi_N = 0,$$

откуда

$$I = \frac{U_{Nk}}{2R} = \frac{I_{kk}}{2}, \quad (625)$$

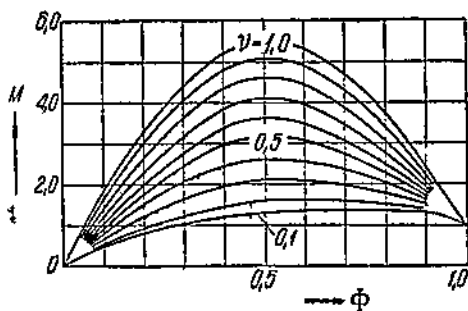
где I_{kk} — ток короткого замыкания двигателя при напряжении U_{Nk} . Стало быть, момент двигателя достигает максимума при $U_{Nk} = 2IR$, а при $U_{Nk} < 2IR$ двигатель опрокидывается. Подобные условия могут иметь место при малых напряжениях на зажимах двигателя.



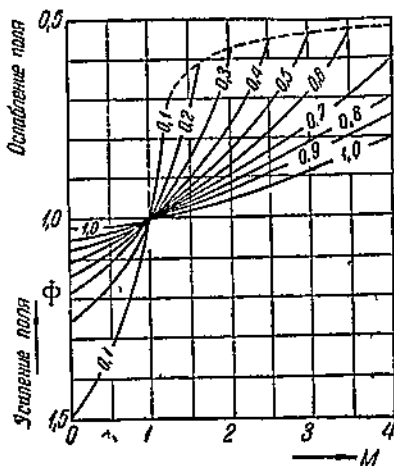
Фиг. 324. Характеристики $M = f(I)$ при $U = \text{var}$ и $\Phi = \text{const}$.

Характеристики двигателя с независимым возбуждением $\mu = f(i_\psi)$ при полном потоке для разных приложенных к двигателю напряжений представлены на фиг. 324. Они показывают, что в многодвигательном приводе по системе Леонарда при широком диапазоне регулировки скорости напряжения с подрегулировкой тока возбуждения двигателя моменты двигателя при всех скоростях должны быть подвергнуты проверке,

Фиг. 325 для двигателей, устанавливаемых на бумагоделательных машинах, с падением напряжения в якорной цепи в 5% иллюстрирует, какие вращающие моменты могут быть получены при различном значении потока возбуждения и разных числах оборотов в минуту двигателя 1,0; ... 0,5; ... 0,1 n .



Фиг. 325. Кривые $M = f(\Phi)$ при $n = \text{const}$ на различных ступенях скорости.



Фиг. 326. Требуемое изменение потока возбуждения для поддержания постоянства скорости при изменении момента нагрузки на различных ступенях скорости.

На фиг. 326 для таких же двигателей показаны требуемые пределы изменения потока возбуждения для поддержания постоянства скорости при изменении момента нагрузки на различных ступенях скорости.

124. Поддержание постоянства скорости двигателей постоянного тока посредством быстродействующих регуляторов

Выше было отмечено, что приближенного постоянства скорости двигателей постоянного тока при колебаниях нагрузки можно достичь автоматическим изменением тока возбуждения немедленно после начала изменения скорости. Для того чтобы двигатель не отклонился от той скорости, с которой он должен идти, это изменение должно быть быстрым, и возврат двигателя с маховыми массами привода к необходимой для производственного процесса скорости должен быть почти мгновенным. Лучше всего это выполняется посредством быстродействующих регуляторов, применяемых также для поддержания постоянства напряжения генератора на электрических станциях и некоторых фабрично-заводских преобразовательных подстанциях [Л. 206 — 208].

Идея работы этих регуляторов заключается в следующем, При всяком изменении напряжения генератора или числа оборотов двигателя постоянного тока необходимо изменить их ток возбуждения. Если изменение тока возбуждения произвести до величины, как раз соответствующей необходимому напряжению или необходимому числу оборотов в минуту при данной нагрузке, то время, которое пройдет до возврата машины к нужному режиму, будет довольно продолжительным, ибо магнитная инерция обмотки возбуждения всегда задерживает изменение тока. Последний изменяется по экспоненциальному закону

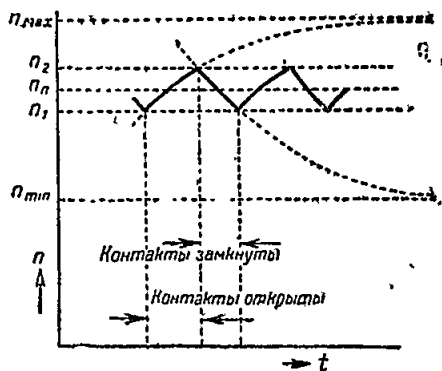
$$i = \frac{U}{R} \pm \frac{\Delta U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{L/R}}).$$

В двигателях постоянного тока процесс возврата к необходимой скорости удлиняется еще тем, что вращающий момент, развиваемый двигателем в переходном режиме, должен быть достаточен для быстрого возврата маховых масс к нужной скорости, т. е. для преодоления динамического момента.

С этой целью как в генераторах, так и в двигателях постоянного тока применяется следующий способ быстродействующего регулирования. Положим, что напряжение генератора должно оставаться постоянным и равным хотя бы 220V. Для быстрого регулирования в цепь возбуждения вводится некоторое добавочное сопротивление. Если оно включено целиком, то напряжение генератора при установившемся режиме будет значительно меньше номинального, положим 200V. Если же сопротивление полностью выведено, то напряжение генератора при установившемся режиме будет значительно больше номинального, положим 240 V. Как только напряжение генератора становится ниже номинального 220 V на доли процента, быстродействующий регулятор почти мгновенно выключает из цепи возбуждения соответствующее сопротивление. Генератор, получая ток возбуждения, соответствующий установившемуся напряжению в 240 V, стремится к напряжению в 240 V и тем самым быстро достигает нужных 220 V. Как только напряжение получит значение немного больше 220 V, регулятор вновь вводит сопротивление, и генератор стремится к напряжению в 200 V. Тем самым значение напряжения в 220 V будет достигнуто опять-таки в кратчайший срок. При работе контакты регулятора непрерывно замыкаются и размыкаются и напряжение генератора непрерывно колеблется, выше и ниже устанавливаемого, отличаясь от последнего на доли процента.

Совершенно аналогично протекает процесс при поддержании постоянства скорости шунтового двигателя постоянного тока. Если, например, в двигателе необходимо иметь постоянное число оборотов в минуту, равное хотя бы 500, то быстродействующий регулятор, меняя ток возбуждения двумя ступенями, заставляет двигатель непрерывно колебаться между 450 и 550 об/мин. Непрерывное колебание числа оборотов двигателя по экспонен-

циальным кривым представлено на фиг. 327. Как отмечено выше, точность поддержания скорости двигателя, как и напряжения генератора, имеет порядок десятых долей процента.

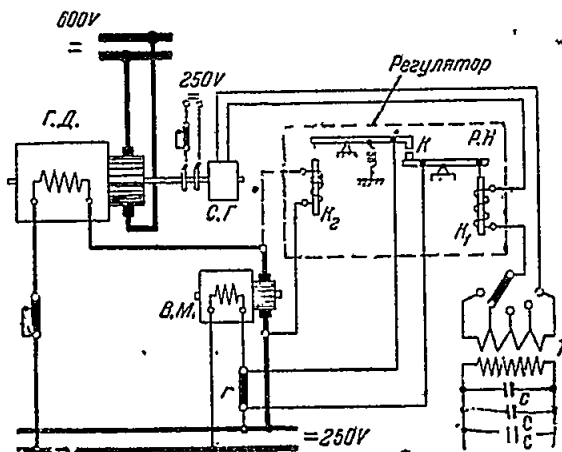


Фиг. 327. Идея работы быстродействующих регуляторов.

Быстродействующие регуляторы бывают разных типов. Мы коснемся здесь наиболее распространенного, а именно—регулятора Тиррилла.

Отметим, что в практике электрического привода быстродействующие регуляторы имеют значение как для двигателей, так и для генераторов. В том случае, когда нужно поддерживать постоянство скорости приводных двигателей постоянного тока, питаемых

от генератора Леонарда, важно кроме воздействия на токи возбуждения двигателей поддерживать постоянным напряжение питающих их генераторов, чтобы исключить всякое влияние колебания



Фиг. 328. Поддержание постоянства скорости двигателя регулятором Тиррилла.

этого напряжения на скорость двигателей. Для этой цели применяются также быстродействующие регуляторы. Особо важное значение этот вопрос имеет для бумагоделательных машин.

Схема поддержания постоянства скорости двигателя постоянного тока регулятором Тиррилла представлена на фиг. 328. В ней

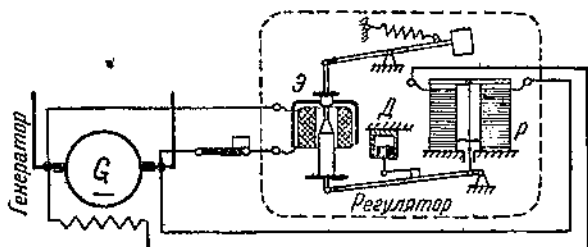
в цепь возбуждения главного двигателя $ГД$, вращающего рабочую машину или отдельный элемент ее, включена вольтодобавочная машина $ВМ$. Контакты регулятора Тирилла $К$ шунтируют сопротивление, включенное в цепь возбуждения этой машины. Применение вольтодобавочной машины снижает силу тока, разрываемую контактами реле регулятора.

На вал $ГД$ насажен вспомогательный синхронный генератор $СГ$. При повышении скорости $ГД$ сверх некоторой определенной катушка $К_1$ замыкает контакты регулятора и тем самым шунтирует сопротивление в цепи возбуждения вольтодобавочной машины. Напряжение на зажимах обмотки возбуждения $ГД$ повышается за счет добавочного напряжения вольтодобавочной машины, ток возбуждения двигателя увеличивается, и двигатель стремится снизить свое число оборотов в минуту к некоторому минимуму, значительно отличающемуся от необходимого.

Ограничение дается катушкой $К_2$. Повышение напряжения вольтодобавочной машины происходит не сразу, а постепенно за счет влияния электромагнитной инерции ее обмотки возбуждения. Как только напряжение $ВМ$ достигает такой величины, что скорость двигателя становится равной той, которую хотят поддерживать, то катушка $К_2$ размыкает контакты регулятора. Двигатель снова стремится повысить свою скорость и т. д.

Вспомогательный генератор мог бы быть генератором как постоянного, так и переменного тока. Для того чтобы самоиндукция катушки $К_1$ не усложняла процесса регулирования, $ВГ$ берется генератором переменного тока (синхронным), а в цепь катушки $К_1$ для компенсации самоиндукции вводится емкость $С$. Назначение трансформатора T заключается в повышении приложенного к конденсаторам напряжения в целях их удешевления. Так как двигатель $ГД$ обычно регулируемый и регулятор должен поддерживать постоянным число оборотов в минуту, устанавливаемое в весьма широких пределах, а самоиндукция $К_1$ меняется со скоростью двигателя, то влияние конденсатора также регулируется путем изменения числа витков первичной обмотки трансформатора. Регулировка последнего ведется одновременно с изменением сопротивления R_1 , воздействующего на скорость двигателя. При применении конденсаторов точность поддержания постоянства скорости повышается до 0,1—0,05%, от 0,5%—без них.

Заметим, что в практике последнего времени вместо быстродействующих вибрационных регуляторов напряжения [Л. 206—207] стали применять угольные регуляторы, которые у нас изготовлял ХЭМЗ. Схема включения угольного регулятора для поддержания постоянства напряжения генератора представлена на фиг. 329. Такой регулятор состоит из электромагнита, приключенного к зажимам регулируемого генератора, и угольного реостата, собранного из угольных шайб. Сопротивление угольного столба варьирует в зависимости от испытываемого им давления. При нормальном напряжении генератора втягивающая сила электромагнита



Фиг. 329. Включение угольного регулятора для поддержания постоянства напряжения генератора постоянного тока.

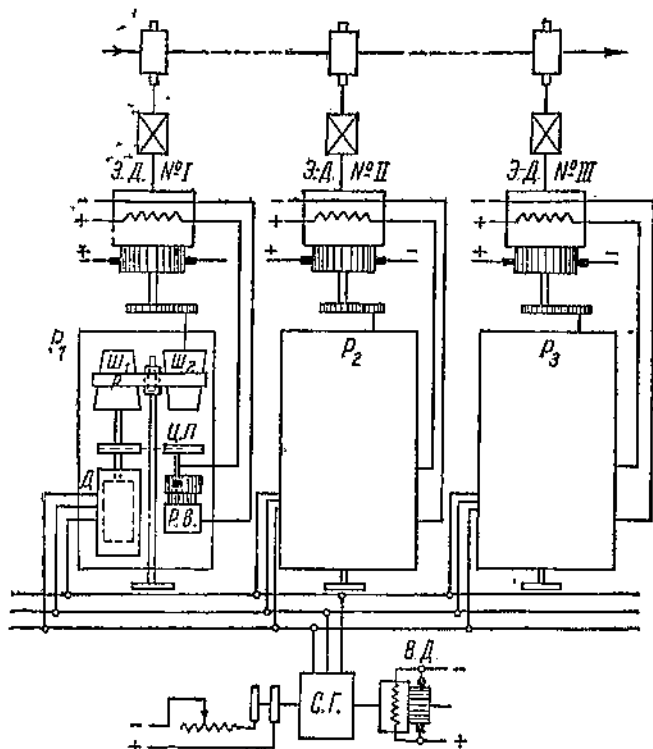
уравновешивается пружиной, при возрастании напряжения электромагнит оттягивает сердечник, что уменьшает давление на угольный столб. Сопротивление последнего увеличивается, и напряжение снижается до нормальной величины. Для успокоения колебаний здесь применен воздушный демпфер D из цилиндра с графитовым поршнем.

В тех машинах, в которых запас возбуждения мал и требуется изменение сопротивления регулятора от нуля, к регулятору пристраиваются шунтирующие контакты, которые замыкают угольный реостат накоротко. В силу своей большой простоты и более легкой работы этот регулятор в практике промышленного привода находит широкое распространение. Один из примеров его применения будет дан дальше. Специальный регулятор скорости, спроектированный ХЭМЗ и основанный на использовании реле регулирования скорости, описан в [Л. 208].

125. Поддержание постоянства скорости посредством трехфазных дифференциалов

Подобная система, нашедшая применение для бумагоделательных машин, прокатных станов, текстильных отделочных машин, представлена на фиг. 330.

С валом каждого рабочего двигателя, входящего в группу многодвигательного привода, связывается через вспомогательную ременную передачу с конусными шкивами реактивный двигатель D (синхронный двигатель с явно выраженными полюсами без возбуждения). Статоры реактивных двигателей всех регуляторов питаются током одной и той же частоты от вспомогательного синхронного генератора $СГ$, вращаемого регулируемым двигателем постоянного тока. Эти статоры сконструированы таким образом, что они могут поворачиваться (но не вращаться). Если главный двигатель идет с постоянной скоростью, то ротор реактивного двигателя вращается с той же скоростью, что и поле его статора. Скорость последнего подбирается регулированием частоты. Ника-



Фиг. 330. Поддержание постоянства скорости трехфазным реактивным дифференциалом.

кого вращающего момента между статором и ротором реактивного двигателя дифференциала не возникает. Статор его остается в покое. Однако достаточно главному двигателю ускориться или замедлиться, чтобы мы получили смещение в реактивном двигателе поля статора относительно поля ротора, что и создаст вращающий момент между статором и ротором. Так как ротор мало мощного реактивного двигателя вращается мощным двигателем, то задержать главный двигатель реактивный двигатель не сможет. Повернется статор реактивного двигателя. Поворот статора через цепную или ременную передачу ЦП (не вращающуюся вместе с валом) вызовет изменение сопротивления в цепи возбуждения главного двигателя путем поворота щетки на коллекторе реостата возбуждения РВ. К коллекторным пластинам последнего присоединены отдельные секции реостата. Коллектор для реостата применен здесь исключительно по конструктивным соображениям.

Всякое отклонение двигателя от той скорости, которую он должен иметь, будет вызывать поворот статора реактивного двигателя в ту или другую сторону. Тем самым будет меняться ток

возбуждения двигателя и восстанавливаться его скорость. При необходимости изменить скорость всех двигателей сразу нужно одновременно менять частоту тока, питающего реактивные двигатели, т. е. скорость синхронного вспомогательного генератора. Его частота является общей для всех главных двигателей и служит таким образом ведущей частотой. Она и определяет ту скорость системы, которая поддерживается постоянной.

Ввиду того что по условиям производственного процесса часто требуется изменение соотношения между скоростями отдельных двигателей, между роторами реактивных двигателей и валами главных введена передача P с переменным передаточным числом в виде ременной передачи с коническими шкивами $Ш_1$ и $Ш_2$.

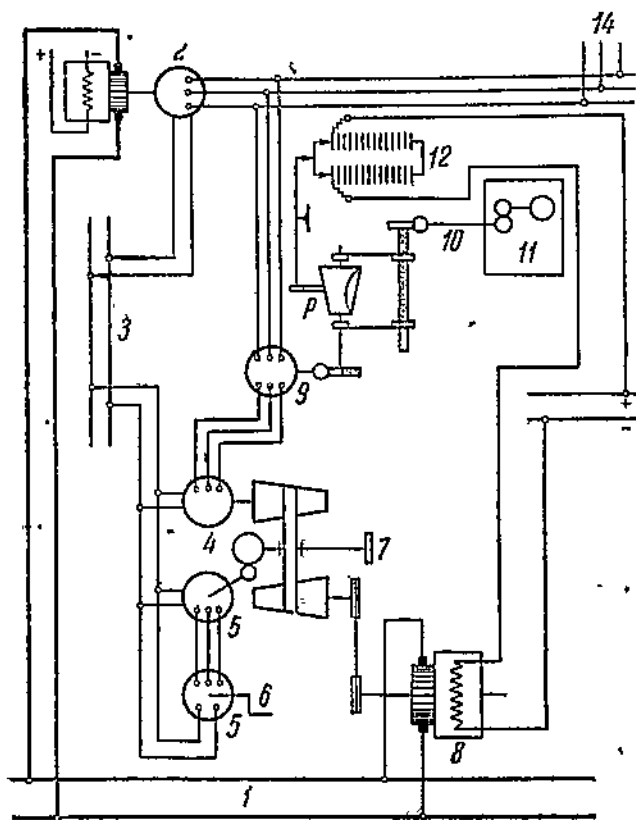
Она дает возможность менять скорость главного двигателя при неизменной скорости ротора реактивного. Подобные регуляторы у нас изготовлялись ХЭМЗ и установлены на ряде бумагоделательных машин в СССР.

В настоящее время эта система производством у нас прекращена из-за следующих ее недостатков: 1) наличие ременных или цепных передач; 2) большие статические и динамические сопротивления; 3) большие габариты; 4) невозможность переноса регулятора в подстанцию; принципиально эта система отличается синхронностью, синфазностью и астатичностью. Однако эти ценные свойства компенсируются указанными выше недостатками.

126. Система поддержания постоянства скорости с самосинами и угольным регулятором

В системах поддержания постоянства скорости последнего времени широко используются в качестве дифференциалов самосины, воздействующие на угольные сопротивления в цепи возбуждения двигателей. Подобная схема представлена на фиг. 331.

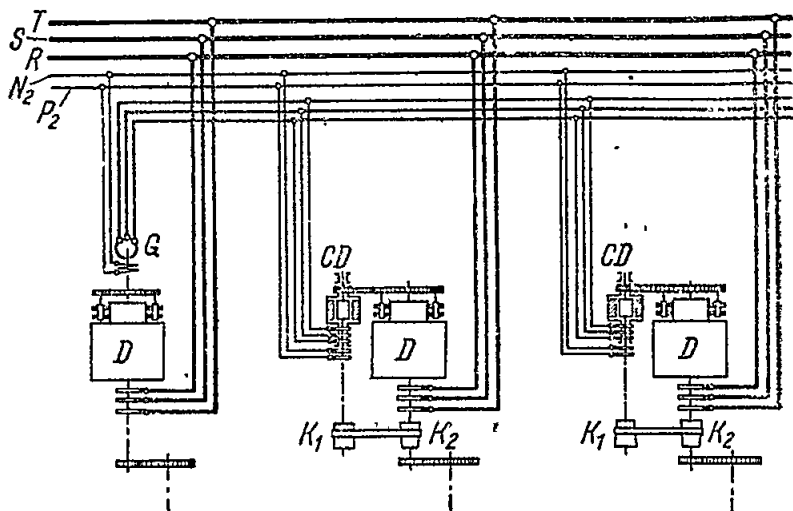
Первичная цепь всех представленных на фиг. 331 самосинов питается от однофазной цепи 3. Ведущий самосин 2, являющийся общим для всех двигателей системы, вращается особым двигателем постоянного тока, приключенным к той же сети 1, что и секционные двигатели. При изменении скорости последних по принципу Леонарда одновременно меняется и скорость этого двигателя, играющего с самосином 2 роль основного регулирующего агрегата. Каждый секционный двигатель 8 вращает свой самосин 4 через две промежуточные передачи—одна из них с переменным передаточным числом. Частота тока этого самосина 4 должна сравниваться с частотой ведущего самосина 2. Эти две частоты воздействуют на дифференциальный самосин 9 (двигатель двойного питания с вращением полей в одну сторону). При равенстве двух указанных частот ротор дифференциального самосина стоит на месте. При всяком отклонении одной из частот самосин поворачивается в ту или другую сторону и воздействует на угольный



Фиг. 931. Схема поддержания постоянства скорости с самосинами и угольным регулятором.

регулятор с угольными столбиками 12 в цепи возбуждения. Два нижних самосина схемы 5 непосредственно в регулировке не участвуют и используются исключительно для подрегулировки тяжения бумаги (металла в прокатном стане) или изменения передаточного числа между главным двигателем и передающим самосином с любого места посредством ручки 6. Поворот нижнего самосина, связанного с регулирующей ручкой, влечет синхронный поворот второго на такой же самый угол, что через промежуточную зубчатую передачу вызывает перемещение ремня на передаче с коническими шкивами.

Ручка 7 служит для изменения передаточного числа на конусных шкивах. Передачи 10 и 11 служат для регулировки сопротивления реостата в цепи возбуждения посредством серводвигателя при регулировке скорости.



Фиг. 332. Поддержание постоянства скорости двигателей Шраге.

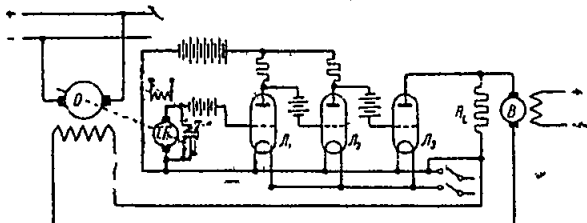
На фиг. 332 приведена схема для поддержания постоянства скорости двигателя типа Шраге. Здесь воздействие на скорость двигателя производится посредством сдвига щеток. Щетки могут передвигаться синхронным двигателем CD так же, как и щетки на коллекторном реостате для цепи возбуждения двигателя постоянного тока.

127. Поддержание постоянства скорости двигателей посредством ионно-электронных аппаратов

Инерционность и ряд других недостатков способов поддержания постоянства скорости с помощью устройств, описанных выше, повели в последние годы к использованию для рассматриваемых целей ионно-электронных аппаратов [Л. 209—213]. Все рассмотренные ранее способы относились к астатическому, т. е. непрерывно действующему регулированию. В схемах с ионно-электронными аппаратами может применяться регулирование как астатическое, так и статическое, т. е. действующее лишь тогда, когда требуется регулировка, ибо в них эффект от малой разности скоростей ведущего и ведомого двигателей может быть усилен значительно и так, чтобы дать необходимую интенсивность регулирования. Статическое регулирование производится под влиянием изменения скорости регулируемого двигателя. Астатическое регулирование действует под влиянием расхождения роторов двигателей по фазе.

На фиг. 333 приведена схема статического регулирования посредством электронных ламп. В схеме фиг. 333 на вал приводного электродвигателя D насажен тахометрический генератор ($ТГ$).

Последовательно с ним включается или аккумуляторная батарея — при поддержании скорости одного двигателя, или напряжение другой таходинамо ведущей оси — в случае одновременного поддержания скорости многодвигательного электропривода. Разностное напряжение этих двух источников подается на сетку электронной лампы L_1 . Регулируемый двигатель получает ток возбуждения от каскада усилительных ламп через особый возбуждатель. Введение добавочного возбуждателя необходимо по следующим соображениям:



Фиг. 333. Поддержание постоянства скорости посредством электронных ламп при статическом регулировании.

1) для защиты двигателя от разноса при порче электронной лампы;

2) для увеличения степени регулирования тока возбуждения. Для уменьшения тока лампы параллельно ей включено сопротивление R_L .

Очевидно, что напряжение на сетке 1-й лампы усилителя:

$$e = (U_T - U_s),$$

где U_T — напряжение таходинамо; U_s — стабильное напряжение источника.

Напряжение на сетке последней лампы каскада будет равно:

$$E = k \cdot (U_T - U_s),$$

где k — зависит от числа усилительных ламп и их параметров.

Если крутизна рабочей характеристики лампы будет S , а I_a — анодный ток усилителя, то ток возбуждения

$$I_b \approx c \cdot I_a = c \cdot S \cdot E.$$

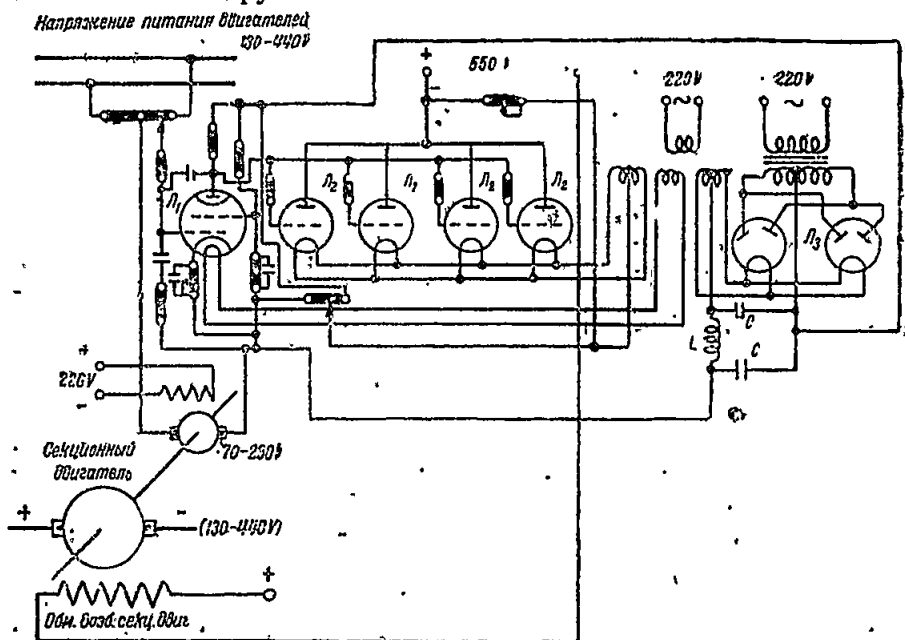
В свою очередь число оборотов двигателя в минуту при ненасыщенной машине

$$n = c_2 \cdot \frac{U - I_a \cdot R}{I_b} = c_2 \cdot \frac{U - I_a \cdot R}{c \cdot S \cdot E} = c_2 \cdot \frac{U - I_a \cdot R}{c \cdot k (U_T - U_s)},$$

Степень допустимого усиления ограничивается условиями возникающего колебательного процесса.

Исследование этой схемы на двигателе мощностью 6 kW, 1500 об/мин Рейманом показало, что при изменении нагрузки на 35% наибольшее отклонение скорости составило 0,35—1,2%

при изменении установившейся скорости в 0,26 — 0,04%. Длительность колебательного процесса получилась равной в 0,55 — 1,6 сек. Вследствие зависимости установившейся скорости от нагрузки подобные схемы применимы лишь для электроприводов с малыми колебаниями нагрузки.



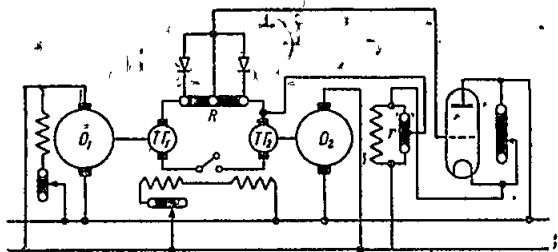
Фиг. 334. Схема Ленинградского отделения Электропрома для поддержания постоянства скорости.

В тех случаях, когда сила тока возбуждения двигателя оказывается сравнительно большой, одна электронная лампа при необходимом соотношении токов через лампу и шунтирующее сопротивление не может пропустить нужного значения тока. При этом последний ламповый каскад приходится собирать из нескольких электронных ламп, включенных параллельно. Подобная схема, разработанная Ленинградским отделением Электропрома, представлена на фиг. 334. В ней регулятор включает два каскада, из которых последний состоит из четырех параллельно включенных ламп. Такая схема применена на бумагоделательной машине Марийского целлюлозного бумажного комбината. К числу недостатков подобных схем следует отнести возможность легкой расстройки схемы при изменении рабочих напряжений, некоторую ограниченность прямолинейной части рабочей характеристики ламп и старение последних.

Схема астатического регулирования при помощи электронных ламп дана на фиг. 335. В ней каждый из двух приводных двига-

телей сочленен с тахометрическим генератором (таходинамо) переменного тока. Расхождение э. д. с. таходинамо по фазе вызывает уравнительный ток в делителе напряжения (сопротивлении R). Напряжение от делителя через выпрямители подается на сетку электронной лампы. Сопротивление r применено в схеме для установления рабочей точки на характеристике лампы. Недостатком схемы является возможность колебаний при сильном изменении нагрузки.

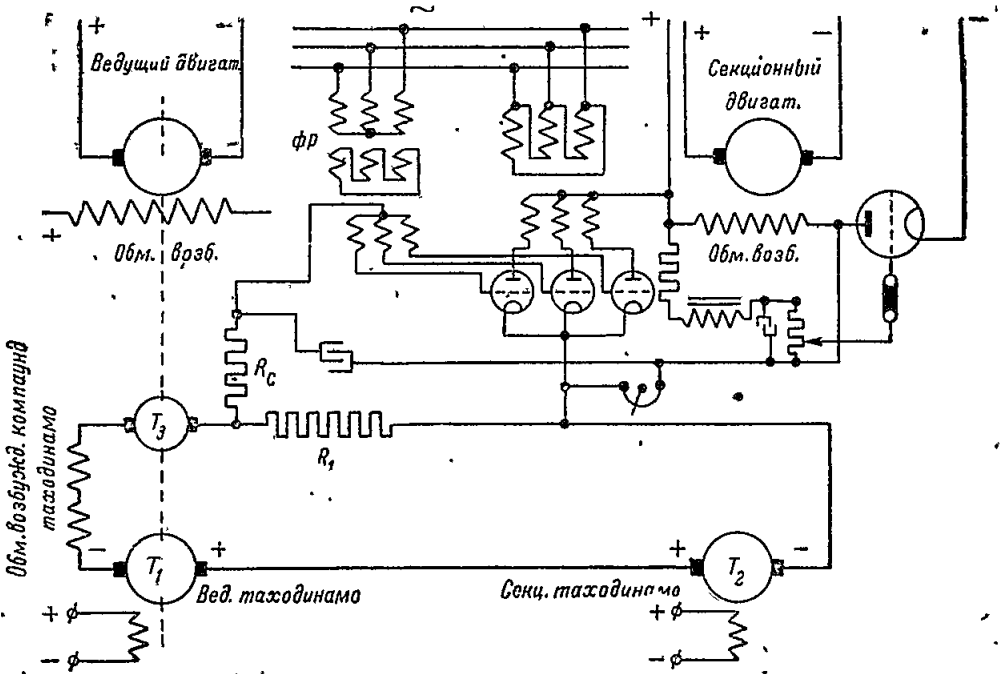
Недостаточная мощность электронных ламп и в силу этого ограниченность применения соответствующих схем для мощности



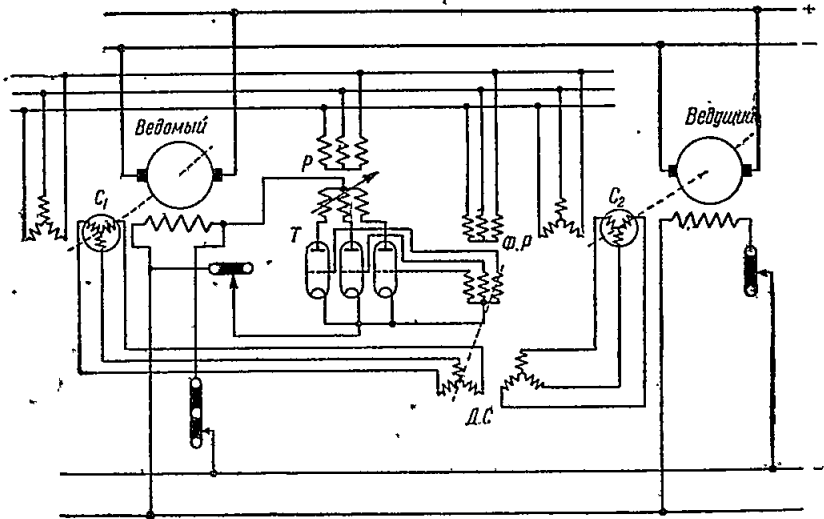
Фиг. 335. Поддержание постоянства скорости посредством электронных ламп при астатическом регулировании.

двигателей не свыше 100 kW повела к использованию для поддержания постоянства скорости в более мощных приводах тиратронов. Мощность схем с тиратронами практически не ограничена. Одна из таких схем, начатая разработкой в ВЭИ, доведенная до промышленного использования ХЭМЗ и намеченная им для установки на приводе бумагоделательных машин Красноярского комбината [Л. 212], представлена на фиг. 336.

Регулирование в этой схеме статическое. Питание обмотки возбуждения секционного двигателя производится от трех тиратронов. Для поддержания постоянства скорости на валы ведущего и секционного двигателя насажены две таходинамо T_1 и T_2 . Они связаны через последовательное сопротивление R_1 . Кроме того в разностную цепь напряжений обеих таходинамо T_1 и T_2 введена компаундирующая динамо T_3 . При колебаниях скорости секционного двигателя разность напряжений T_1 и T_2 передается на сетку усилительной лампы. Последняя питает сеточные цепи тиратронов. Для повышения динамической точности работы системы при сохранении высокой чувствительности при малой степени астатичности в схеме использован специальный контур компенсации колебаний из добавочных сопротивлений и емкости в сеточной цепи. При изменении тока возбуждения в период регулировки на



Фиг. 336. Схема ХЭМЗ статического регулирования с тиратронами.



Фиг. 337. Схема поддержания постоянства скорости с тиратронами.

сопротивлениях создается такое падение напряжения, при котором система приходит к устойчивому равновесию без колебаний.

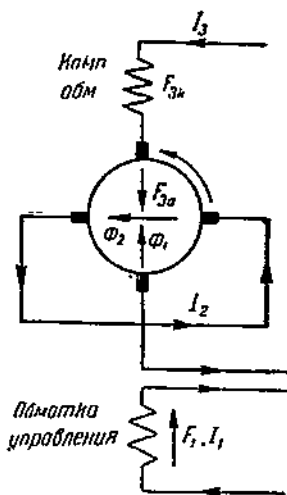
Другая схема с тиратронами, разработанная также в ВЭИ и на ХЭМЗ, представлена на фиг. 337 [Л. 211, 213]. В ней питание обмотки возбуждения двигателя, скорость которого должна поддерживаться постоянной, производится параллельно от двух источников: 1) неизменного напряжения и 2) регулируемого тиратрона. Регулировка двигателя происходит за счет изменения тока, поступающего от тиратрона. При этом на валы ведущего и ведомого двигателя насажены самосины C_1 и C_2 , питающие дифференциальный самосин DC . При отставании ведомого двигателя от ведущего дифференциальный самосин поворачивается и вращает фазорегулятор ΦP , подающий напряжение на сетку тиратронов T , чем и достигается соответствующая регулировка. Испытание схемы дало хорошие результаты.

128. Возможности использования амплидина

Несколько ограниченный срок службы и высокая стоимость тиратронов побудили фирму GEC создать такой аппарат электромашиного типа, который обладал бы весьма малой инерционностью и большим усилением и в этих отношениях был бы аналогичен тиратрону. Подобная машина была названа «амплидин» (amplifier—усилитель, дупато—машина) [Л. 215—216]. Амплидин представляет генератор постоянного тока с дополнительной парой поперечных короткозамкнутых щеток (фиг. 338), служащей для создания поперечного поля, как и в машине Розенберга, используемой для освещения поездов.

При вращении якоря амплидина в поле возбуждения Φ_1 , создаваемом обмоткой возбуждения (управления), в цепи короткозамкнутых щеток индуцируется ток I_2 , вызывающий поперечное поле Φ_2 . Это поле индуцирует на щетках продольной оси э. д. с. E_0 , подающую во внешнюю цепь ток I_3 . Магнитодвижущая сила $F_{\alpha a}$ поля якоря компенсируется м. д. с. $F_{\alpha k}$ компенсационной обмотки.

Для компенсации дополнительных магнитных потоков и устранения колебаний машина конструируется ненасыщенной и с несколькими компенсационными обмотками по продольной и поперечной оси. Вследствие полной компенсации в машине потока реакции якоря ампервитки возбуждения могут быть незначительны. При малом токе управления I_1 омическое сопротивление цепи

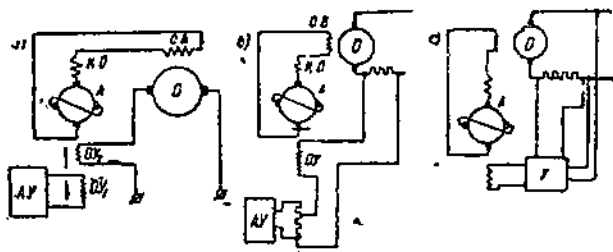


Фиг. 338. Амплидин.

управления может быть взято большим, а тем самым электромагнитная постоянная времени цепи управления может быть сделана весьма малой. Этим и достигается нужная безинерционность, почти эквивалентная условиям работы тириатронов. Каждая из двух ступеней усиления (одна от цепи управления к оси поперечных щеток и другая от оси поперечных щеток к оси продольных) дает усиление вольтампер в 100 раз. Результирующее усиление амплидина достигает примерно 10 000. Конструируется амплидин пока до мощностей в 25 kW.

Амплидин применяется прежде всего там, где необходимо поддержать постоянство какого-либо фактора, например, силы тока, напряжения, числа оборотов в минуту, пройденного пути и т. д.

При больших мощностях приводимых двигателей амплидин используется в качестве их возбuditелей; при малых мощностях — непосредственно в качестве генератора Леонарда. Для управления амплидином применяются вообще три основных схемы (фиг. 339).



Фиг. 339. Принципиальные схемы включения амплидина.

Первая схема (фиг. 339а) предназначена для поддержания постоянства регулируемого параметра (силы тока двигателя). В ней амплидин имеет две обмотки независимого возбуждения — обмотку управления OY_1 , питаемую от независимого источника, и обмотку OY_2 , питаемую током регулируемого двигателя D . Точность работы схемы несколько процентов. Во второй схеме (фиг. 339б) ток в обмотке управления определяется разностью двух напряжений: постоянного, получаемого через аппарат управления AV , и переменного, определяемого регулируемым параметром (током якоря двигателя). По точности эта схема превосходит первую. Третья схема представляет видоизменение схемы второй с введением лампового (электронного) усилителя. Эта схема пригодна для поддержания постоянства скорости двигателя. В 1939 г. фирмой GEC установлено в промпредприятиях около 100 амплидинов.

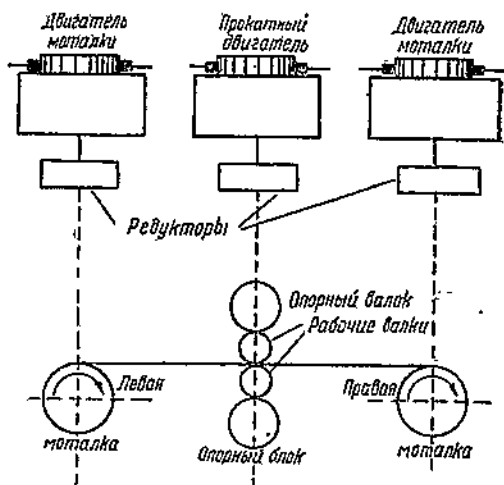
Амплидины использованы в промышленности для разных целей: для управления реверсивными прокатными станами, станами холодной прокатки, доменными и шахтными подъемниками, для точной установки перемещения шпинделя расточного станка, для поддержания постоянства натяжения ленты в станах холодной прокатки, для поддержания постоянства скорости бумагодела-

тельной машины и непрерывных прокатных станов, для перемотных станков бумажной промышленности, для автоматического повышения тока возбуждения синхронного двигателя при пиковой нагрузке и т. д.¹

129. О некоторых других типичных функциях электроприводов

Наряду с поддержанием постоянства скорости отдельных исполнительных механизмов в промышленности возникает иногда необходимость поддержания постоянства тяжения обрабатываемого материала между отдельными звеньями многодвигательного привода. Наиболее типичными в этом отношении являются регулируемые станы холодной прокатки, имеющие при современном развитии нашей промышленности исключительное значение.

Наиболее распространенный реверсивный тип этого стана состоит из одной четырехвалковой клетки с двумя приводящимися одним двигателем средними рабочими валками и двумя холостыми опорными валками большего диаметра. С передней и задней стороны стан имеет две моталки — одну для наматывания прокатываемой ленты, другую — для разматывания. В зависимости от направления прокатки роль моталок меняется. Каждая из них имеет самостоятельный привод (фиг. 340).



Фиг. 340. Привод реверсивного стана холодной прокатки.

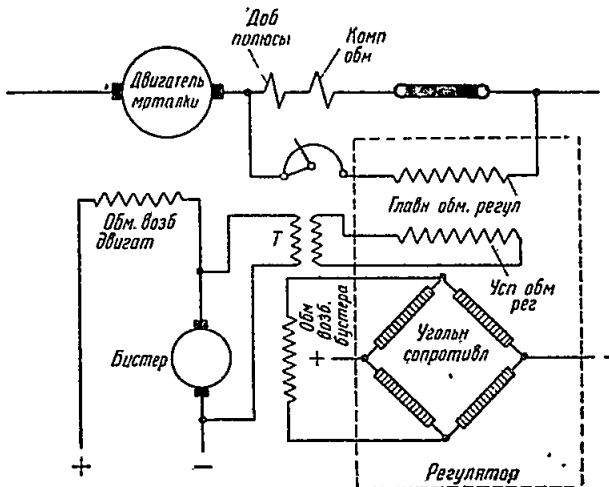
Прокатка ведется двигателем рабочих валков и передней моталки. Процесс продолжается 4—5 пропусков. Подробное рассмотрение процесса дано в [Л. 217—223].

В нормальном рабочем процессе (исключая заправку металла) двигатели обеих моталок работают в разных режимах: двигатель наматывающей стороны — в двигательном режиме, разматывающей — в генераторном. Условия получения металла необходимого качества и нужной толщины требуют, чтобы натяжение полосы как на входной, так и выходной стороне оставалось постоянным.

¹ Краткое рассмотрение механических характеристик амплидина дано в книге автора «Последние достижения в электроприводе в СССР и за границей», ВНИТОЭ, 1944 г.

При различной толщине металла при штамповке из него изделий могут образоваться трещины и рванины. Это и обуславливает обязательность работы двигателя разматывающей стороны в генераторном режиме.

Непрерывное изменение диаметра наматывающей и сматывающей моталок за счет намотанной и смотанной ленты требует, непрерывной регулировки скорости их двигателей для поддержания постоянства тяжения ленты. К этому добавляется необходимость регулирования всех трех двигателей стана в зависимости от прокатываемого сортамента. Суммарный диапазон регулирования моталок от 1 : 3 до 1 : 7. Подобный привод обычно осуществляется по системе Леонарда с подрегулировкой скорости двигателя токсом возбуждения. Так как скорость прокатки v и тяжение металла F должны оставаться постоянными, то потребная для натяжения



Фиг. 341. Схема поддержания постоянства тяжения в станах холодной прокатки.

мощность $P = \frac{F \cdot v}{\eta}$ должна также оставаться постоянной. Если принять равенство полезной мощности двигателя и подведенной к нему, то задача поддержания постоянного тяжения в первом приближении будет заключаться в поддержании постоянной подведенной к двигателю мощности. При неизменном напряжении на зажимах двигателя поддержание постоянства мощности будет сводиться к поддержанию постоянства тока.

Для этой цели может быть применен специально включенный быстродействующий угольный регулятор [Л. 222]. Принципиальная схема включения для этого случая приведена на фиг. 341.

Изменение тока возбуждения двигателя моталки происходит автоматически под влиянием бустера (вольтодобавочной машины), введенного в цепь возбуждения двигателя. Напряжение бустера меняется под действием угольного регулятора. Четыре сопротивления последнего включены на контрольную цепь постоянного тока по схеме моста Витстона. К двум узловым точкам моста присоединена обмотка возбуждения бустера. Главная токовая катушка регулятора введена в главную цепь двигателя моталки параллельно компенсационной обмотке и обмотке дополнительных полюсов. Всякое увеличение нагрузки (тока) двигателя вызывает работу регулятора, т. е. изменение сопротивлений схемы моста Витстона, в результате чего увеличивается или уменьшается напряжение бустера, а с ним и ток возбуждения двигателя моталки. При этом будут происходить непрерывные колебания регулятора. Для успокоения последний снабжен вспомогательной катушкой, питающейся через трансформатор от напряжения бустера. Всякое изменение напряжения на бустере будет индуцировать в трансформаторе э. д. с., которая, питая вторую катушку регулятора, будет его стабилизировать.

Целый ряд исполнительных механизмов для осуществления производственного процесса требует автоматического регулирования подачи рабочего орудия или обрабатываемого изделия. В целях получения тонкой регулировки подачи часто применяется система Леонарда. Обмотка возбуждения генератора управляется регулятором, находящимся под воздействием некоторого автоматически действующего аппарата, регулирующего на мощность приводного двигателя. Такие подачи разработаны для управления дефибрерами в бумажной промышленности, буровыми станками нефтяной промышленности, фрезерными станками. Инж. Т. Н. Соколовым разработана специальная схема управления подачей копировально-фрезерного станка, в коей воздействие на цепь возбуждения генератора Леонарда производится с помощью тиратронов [Л. 231]. Соответствующий станок изготавливается серийно заводом им. Свердлова и заменил применявшийся до сих пор для соответствующей цели американский копировально-фрезерный станок Келлера. Особый тип подачи на переменном токе применительно к врубовой машине горной промышленности был разработан ВЭИ и используется на практике с 1936 г. [Л. 223—224].

130. Понятие о следящем приводе

В ряде случаев промышленной практики электропривод должен выполнять совершенно определенные наперед заданные операции. В зависимости от характера производственного процесса условия задания на операции могут быть различны. Так, в случае механической обработки изделий определенной формы может быть задан шаблон изделия, и электропривод (однодвигательный или многодвигательный) должен непрерывно следовать этому шаблону. В случае прокатки металла закон постепенного изменения сечения

от пропуска к пропуску задается на основании предварительных расчетов, и перемещение нажимных винтов, сближающих или удаляющих валки прокатных станков, происходит по заранее установленному закону. При регулировании температуры печи подачей воздуха или газа специальный контактный термометр следит за температурой, и при ее изменении включает или выключает двигатель, открывающий затвор. Во многих случаях промышленной практики задача электропривода заключается в согласовании положения рабочего механизма с положением задающего аппарата.

Рассмотренные выше в данной главе примеры поддержания постоянства тяжения, случаи регулирования подачи являются по существу некоторыми примерами решения подобных же задач.

В ряде установок указанные цели могут быть достигнуты или с помощью регуляторов или посредством систем синхронной связи. В свою очередь в ряде установок непосредственное управление электроприводом от регулирующих устройств вследствие их малой мощности оказывается неприменимым. Так, копировальная головка, управляющая работой двигателя в некоторых металлорежущих станках, может лишь воздействовать на цепи управления двигателем, а не на его главные цепи.

Во всех таких случаях применяют так называемый «следающий привод». Под следящим электроприводом понимается электропривод, осуществляющий с некоторой степенью точности перемещения, задаваемые некоторым маломощным чувствительным устройством, которое само по себе функцию привода выполнять не может.

Это устройство, регулирующее отклонение управляемой системы от необходимого для нее в каждый момент времени положения, называется следящим устройством.

Таким образом следящий электропривод состоит из следящей системы и собственно электропривода и представляет усилительное устройство, задачей которого является согласование положения управляемой части (в частности двигателя) с положением управляющего органа.

В идеальном следящем приводе без маховых масс и электромагнитной инерции должна быть синхронность хода и синфазность положения управляемой части и управляющего органа.

В идеальной следящей системе угол рассогласования управляемой части и управляющего органа в любой момент времени должен быть бесконечно близок к нулю. Однако идеальный следящий привод реализован быть не может.

Реальный следящий привод имеет всегда в большей или меньшей мере два недостатка—отставание управляемой части от управляющего органа и колебания системы. Колебания присущи следящему приводу по роду его работы и для их уменьшения должны

быть приняты соответствующие меры посредством успокоения. Успокоение практически ликвидирует колебания полностью или сводит их к минимуму,

Следящий привод может управляться не только электрически, но также пневматически и гидравлически. Мы здесь будем касаться лишь следящего электропривода. Заметим, что в случае рулевых электроприводов на судах следящий привод получил наименование симпатического управления электроприводами [Л. 225].

Основное отличие следящего привода от синхронной передачи заключается в отсутствии прямой электрической связи между передатчиком и приемником. Последние в этом случае разделены следящей системой, т. е. специальным коммутирующим аппаратом. Второе отличие следящего привода от синхронной передачи заключается в том, что синхронность движения вращающейся и исполнительской осей и синфазность положения этих осей в процессе отработки угла, в следящем приводе может вообще и не иметь места, хотя указанные условия и являются весьма желательными.

Отличие следящего привода от простого усилительного устройства заключается в том, что следящая система не воздействует непосредственно на усилительное устройство так, как, например, сетка влияет на ток электронной лампы. Вместе с тем следящий привод представляет форму контроля системы с замкнутым циклом.

Следящий привод применяется вообще для весьма разнообразных целей. Так, он используется для регулирования скорости паровых, гидравлических турбин, для артиллерийских орудий; для стабилизации судов жироскопами, для операции репитеров жироскопов, для обработки изделий в металлорежущих станках по шаблону, для управления рулем, для автоматизации нажимных устройств прокатных станов и вообще для автоматического контроля за изменением любых изменений физических величин.

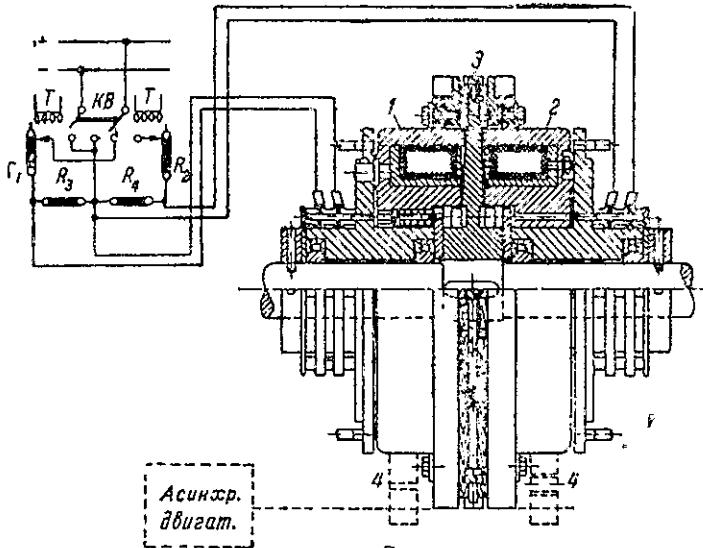
Мощности отдельных следящих приводов колеблются от нескольких ватт в регулировочных устройствах разных типов до нескольких десятков киловатт, например, в нажимном устройстве прокатных станов.

Все системы следящего привода работают в повторно-кратковременном режиме и к ним применены все те требования, которые предъявляются к двигателям соответствующего типа. Степень получаемых колебаний зависит от типа следящего привода, и этот вопрос должен изучаться для каждого типа отдельно. Рассмотрение различных конструктивных разновидностей следящего привода, основ его теории и процесса колебаний дано в [Л. 4, 227, 228].

Весьма интересным промышленным примером следящего привода является привод нажимных устройств прокатных станов [Л. 234—238].

131. Следящий привод с электромагнитными и гидравлическими муфтами

Следящий привод с электромагнитными муфтами применяется в промышленности там, где, обычно хотят иметь реверсивный привод исполнительного механизма от двигателя, вращающегося непрерывно в одну сторону. Такой привод при частых реверсированиях имеет преимущество в том отношении, что во время ускорения исполнительного механизма приходится ускорять лишь его



Фиг. 342. Принципиальная схема привода строгального станка через реверсивную электромагнитную муфту.

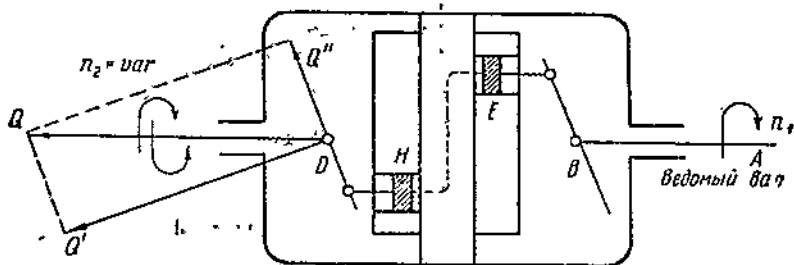
маховые массы. Маховые массы самого двигателя вращаются практически с неизменной скоростью. Следовательно, нужное реверсирование механизма может быть получено в кратчайший срок.

Простейшим образом применения электромагнитных муфт является привод строгального станка от асинхронного двигателя. Принципиальная схема такого привода через реверсивную электромагнитную муфту и зубчатые передачи показана на фиг. 342. Средняя часть муфты 3 (якорь) соединена шпонкой с валом шестерни станка. Обе половинки муфты 1 и 2 с электромагнитами сидят свободно на том же валу и связаны с валом двигателя коническими шестернями 4 для разного направления вращения этих половинок муфты. Предельный концевой выключатель станка *КВ*, играющий роль простейшей следящей системы и в старом трансмиссионном типе привода передвигавший ремень со шкива прямого хода на шкив обратного, в данном случае включает ток в одну или другую половинку муфты; в результате чего и происходит электромагнитное сцепление двигателя с валом шестерни станка. В

зависимости от того, которая половина муфты намагничена, мы получаем движение стола-строгального станка в ту или другую сторону. Рассмотрение процессов в приводе с электромагнитной муфтой дано в [Л. 229 и 230].

Более сложным примером промышленного следящего привода с электромагнитной муфтой является уже упомянутый выше американский копировально-фрезерный станок системы Келлера. Эта система у нас ныне заменена системой Соколова. Вихманом разрабатывается также система фотокопирования изделий на станках по чертежу [Л. 253].

Следящий электропривод с электромагнитной муфтой пригоден лишь для реверсируемых приводов с нерегулируемой скоростью.



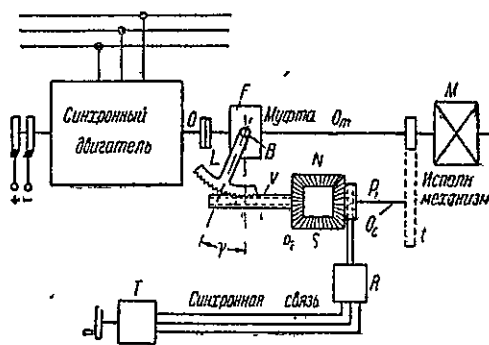
Фиг. 343. Принцип работы гидравлической муфты „Дженни“.

В тех случаях, когда желательно применить привод регулируемого и реверсируемого механизма от двигателя, вращающегося с неизменной скоростью, прибегают к использованию гидравлической масляной муфты. Гидравлические муфты применяются у нас в качестве связующего звена между синхронными или асинхронными двигателями и приводимыми ими регулируемыми дымососами и вентиляторами центральных электрических станций. Существует целый ряд конструкций гидравлических муфт, позволяющих производить плавную регулировку числа оборотов в минуту и реверсирование ведомого вала. Наиболее распространенной муфтой является муфта Дженни.

Принцип ее действия следующий (фиг. 343). Ведомый вал соединен с приводным двигателем, имеющим постоянное число оборотов в минуту. С конца этого вала с помощью шарнира Гука связан диск *B*. В нем шарнирно закреплены концы нескольких штоков поршней, концентрически размещенных в цилиндре. Посредством специального приспособления, на рисунке не показанного, можно менять положение диска *B* в вертикальной плоскости. Во время вращения вала *A* поршни *E* при своем перемещении будут всасывать и нагнетать масло, наполняющее муфту. Вторая половина муфты аналогична первой, только в ней наклон диска *D* постоянен. Масло, нагнетаемое поршнями *E*, по специальным каналам

распределителя поступает к поршням H второй половины муфты. Создаваемое давлением масла усилие Q раскладывается на две перпендикулярных составляющих, из которых одна уничтожается в опорных подшипниках, а вторая заставляет диск D вращаться.

Изменение наклона диска B меняет длину хода поршней, а следовательно, и количество нагнетаемого масла, т. е. усилие Q . Таким образом, меняя наклон диска B , можно менять ход поршней H ,



Фиг. 344. Следящий привод с гидравлической муфтой.

а стало быть и скорость диска D . При $n_1 = \text{const}$ скорость n_2 может плавно меняться от 0 до n_1 . Описание конструкции муфты Дженни дано в [Л. 4].

Пример следящего привода с синхронным двигателем и гидравлической муфтой показан на фиг. 344.

Для поворота переставной части муфты F служит рычаг L , зубчатый сектор которого сцеплен с червяком V , соединенным через механический дифференциал p_2, NSp_1 с валом приемника маломощной синхронной передачи от самосинов.

Ось сателлитов O_c дифференциала связана при помощи соответствующей передачи с ведомым валом O_m . Требуемый поворот исполнительного механизма в данном случае достигается поворотом передатчика T , а с ним и приемника R , который передвигает рычаг L на некоторый угол γ . Благодаря этому вторая половина муфты приходит в действие, а с ней и исполнительный механизм M . Вращение последнего будет происходить до тех пор, пока вал O_m через передачу t и дифференциал не приведет рычаг L в исходное положение, т. е. пока механизм M не повернется на заданный синхронным передатчиком T угол. При задании угла передатчиком ось O_c неподвижна, а шестерни NS , вращаясь вокруг своей оси, поворачивают шестерню p_2 . При отработке механизмом заданного угла шестерня p_1 неподвижна, а вращаются ось O_c с сателлитом и шестерня p_2 . О динамике работы такого следящего привода см. [Л. 4].

132. О точной остановке электроприводов

Исключительно широкое применение электропривода потребовало решения ряда задач, связанных с точной остановкой того или другого исполнительного механизма. Подобные требования вообще могут вытекать из самых разнообразных условий работы приводимых механизмов. Так в некоторых металлорежущих станках, например, расточных, точная остановка привода увеличивает производительность станка, повышает точность изготовления деталей, дает возможность одновременной обработки нескольких отверстий, расположенных на одной или нескольких параллельных осях.

В шахтных подъемниках и лифтах точная остановка необходима как по условиям входа и выхода людей, погрузки и разгрузки материалов, так и по соображениям безопасности. В нажимных устройствах прокатных станков точная остановка необходима для обеспечения целесообразных обжатий металла. В разводных прелетах мостов она нужна для обеспечения правильного смыкания замка. В литейных и монтажных кранах она необходима по условиям их производственного процесса.

Остановка многих механизмов вообще может быть осуществлена выключением двигателя в нужный период времени с помощью конечных или путевых выключателей. Однако, если при этом допустить свободный выбег механизма с электроприводом, то пройденный им путь будет значителен, а остановка в силу неизбежных возможных изменений статического момента механизма в разные периоды времени недостаточно точной. Уточнение места остановки может быть достигнуто применением тормозных электромагнитов, схватывающих тормозной шкив двигателя после выключения последнего.

Однако при восприятии тормозным электромагнитом всей живой силы системы точность в месте остановки получается недостаточно высокой, не удовлетворяющей ряд механизмов, например, металлорежущие станки. Тормозные электромагниты могут получиться громоздкими. Поэтому основная задача осуществления точной остановки заключается обычно прежде всего в предварительном уменьшении живой силы агрегата. Для этой цели используют или электрическое торможение или предварительный перевод двигателя на пониженную скорость.

Переход на пониженную скорость в двигателях постоянного тока осуществляется обычно шунтировкой якоря с последовательно введенным сопротивлением в короткозамкнутых двигателях с переключением полюсов—переходом на большое число полюсов. После предварительного снижения скорости электропривода может быть допущен или свободный выбег или использование тормозного электромагнита, схватывающего тормозной шкив уже при малой скорости. Подобная система удовлетворяет большинство электроприводов, нуждающихся в уточнении места установки [Л. 238]. Автоматическое осуществление этого процесса может быть выпол-

нено посредством путевых выключателей, надлежащим образом подрегулированных. Для выключения и остановки двигателя в лифтах могут быть также использованы: 1) индуктивные выключатели, основанные на изменении магнитной проводимости электромагнита при подходе к нужному месту; 2) фотореле; 3) электронные лампы с воздействием на цепь сетки металлической пластины, проходящей под катушкой самоиндукции; 4) селектора, применяемые фирмой Отис.

Ряд работ по осуществлению точной остановки металлорежущих станков проведен в ЭНИМС.

В некоторых случаях для осуществления нужного небольшого перемещения оказывается целесообразным просто использовать кратковременное импульсное питание электропривода. Оно применяется в режиме установки шпинделей металлорежущих станков, а также для работы монтажных и литейных кранов на переменном токе.

ГЛАВА IX

ВЫБОР РОДА ТОКА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

133. Значение вопроса о выборе рода тока и выбор рода тока для нерегулируемых установок

В современной практике генерирование и передача электрической энергии производится исключительно переменным током. Причины этого заключаются в большей простоте генерирования и распределения переменного тока по сравнению с током постоянным.

Переменный ток дает исключительные возможности в смысле простоты преобразования одного напряжения в другое, а наличие таких преобразований является по существу обязательным условием для распределения электрической энергии от станции к мелкому потребителю. Простота и экономичность преобразования энергии переменного тока посредством трансформаторов пока совершенно не могут сравниться с преобразованием постоянного тока в постоянный другого напряжения или переменного тока в постоянный или обратно.

Таким образом практически все промышленные установки (весьма редкое исключение могут составить лишь электролитические) имеют и будут у нас иметь в качестве основного тока переменный трехфазный ток стандартной частоты 50 Hz.

В случае необходимости применения в промышленных установках постоянного тока последний должен быть получен преобразованием из переменного посредством вращающихся преобразователей или ионных преобразователей в форме ртутных выпрямителей, тиратронов и игнитронов. Такое преобразование энергии повышает первоначальные расходы (стоимость машин, распределительных устройств, зданий) и эксплуатационные расходы (потери в преобразовательных агрегатах, их обслуживание). Синхронные и асинхронные двигатели переменного тока вообще дешевле двигателей постоянного тока из-за отсутствия коллектора. Поэтому, если применение постоянного тока не обусловливается потребностями регулирования скорости или другими специфическими требованиями промышленных предприятий, то технико-экономические соображения требуют использования для приводов и обслуживания предприятий переменного тока. Отсюда вытекает определенное поло-

жение по выбору рода тока для промышленных приводов, а именно: для всех нерегулируемых приводов следует применять наиболее дешевые асинхронные и синхронные двигатели трехфазного тока.

Приходится особо выделять лишь приводы повторно-кратковременного режима работы (краны, подъемные установки, вспомогательные механизмы металлургических заводов и т. п.), от которых требуется работа на разных регулировочных ступенях, и частое реверсирование. В ряде случаев, (металлургические заводы) для этих целей оказывается более целесообразным постоянный ток.

В регулируемых установках с проблемой выбора рода тока обстоит дело сложнее. Здесь приходится применять и постоянный и трехфазный ток, и вопрос в общем решен быть не может. Часто нельзя в общем даже рекомендовать какой-либо вполне определенный род тока для механизмов одного и того же названия, так как производственные условия в рабочих машинах с одинаковым наименованием могут быть различны. Вопрос о роде тока в таких случаях должен быть взвешен весьма серьезно, и часто не только по отношению к заводу или цеху в целом, а и в отношении отдельных приводов. При этом должны быть учтены все их производственные особенности.

В силу того большого опыта, который приобрел в этом отношении наш Советский Союз при оборудовании многочисленных новых заводов двух первых Сталинских пятилеток, в вопросе о выборе рода тока для всех отраслей промышленности ныне у нас внесена достаточная ясность.

Какие же технико-экономические факторы должны влиять на выбор рода тока?

1. Технические требования производственных машин в отношении регулирования скорости, поддержания постоянства скорости и, наконец, перегрузочного момента при повторно-кратковременном режиме работы являются основными факторами, определяющими выбор рода тока. Во многих случаях производственные требования могут быть осуществлены лишь при применении постоянного тока, а следовательно, использование последнего в таких условиях является обязательным. С рассмотрения производственных требований и нужно почти всегда начинать решение вопроса о роде тока. Постоянный ток дает много таких технических возможностей, которые совершенно неосуществимы при переменном токе, например, регулирование в пределах 1 : 20, перегрузочный момент, равный четырехкратному, и т. д. При наличии подобных требований выбора нет и приходится применять постоянный ток.

2. Влияние рода тока на производительность рабочих машин, цехов, заводов является иногда исключительно существенным для решения вопроса о выборе рода тока. Повышение производительности механиз-

мов за счет применения более рационального рода тока может в ряде случаев с избытком покрыть повышение капитальных затрат на оборудование. Это обстоятельство побуждает нас применять постоянный ток в ряде приводов; несмотря на более высокие капитальные затраты (за счет стоимости преобразователей) и более высокие эксплуатационные расходы (за счет большого числа машин и добавочных потерь на преобразование энергии). В ряде случаев применение постоянного тока кардинально меняет кинематику производственных машин, одновременно обуславливая значительное повышение производительности при меньшем расходе энергии.

3. Первоначальная стоимость оборудования вообще и электрооборудования в частности естественно играет роль при выборе. Двигатель постоянного тока дороже двигателя асинхронного. Коллекторный двигатель переменного тока дороже двигателя постоянного тока. В последнем случае при учете первоначальной стоимости преобразователей преимущество в отношении капитальных затрат может быть на стороне коллекторных двигателей переменного тока. Однако, оценивая различные варианты привода по первоначальной стоимости, нужно учитывать и возникающие иногда при разных типах привода видоизменения конструкции рабочих машин, а следовательно, и изменение их стоимости. Этот фактор является исключительно важным и должен быть обязательно учтен.

Применение постоянного тока в ряде случаев несет с собой возможность коренного изменения кинематики машины. Можно легко представить, насколько упростится кинематика крупного токарного станка, если в нем мы осуществим привод от 15 до 20 двигателей вместо одного. Выбросится огромное количество промежуточных механических передач и связей. Понятно, что при сравнении вариантов в некоторых случаях должна быть учтена и стоимость сети, отличная при постоянном и переменном токе.

4. Эксплуатационные расходы, в которых основной частью является расход энергии, также должны быть учтены при сравнении. Опять-таки здесь нужно учитывать общий расход энергии на установку, а не только в самих электродвигателях. Так, при применении двигателей постоянного тока нужно учитывать потери энергии и в преобразовательных агрегатах. Вообще сравнение приводов постоянного и переменного тока в отношении расхода энергии должно быть произведено от начального источника энергии в предприятии—подстанции—до рабочего инструмента, т. е. должны быть учтены потери в передачах самих рабочих машин.

При возможности осуществления производственных требований как на постоянном, так и на переменном токе приходится сравнивать оба рода тока в отношении производительности первоначальных и эксплуатационных затрат и лишь после детального сравнения останавливаться на том или другом роде тока.

Заметим, что ныне чаще приходится рассматривать выбор рода тока для отдельных рабочих машин, а не цеха и завода в целом.

Один цех завода может быть оборудован на постоянном токе, другой — на переменном. В одном и том же цехе иногда должны быть двигатели и постоянного и переменного тока. Первые могут быть необходимы по производственным требованиям на одной части машин, другие по соображениям экономии — на другой регулируемой части машин.

Существующее иногда мнение, что в одном цехе все двигатели должны быть обязательно одного рода тока, ложно: так, в металлообрабатывающем цехе, положим, 50 двигателей могут быть на переменном токе, а 5 — на постоянном, принципиально возможна и обратная комбинация. На одном металлорежущем станке встречаются иногда двигатели постоянного и переменного тока. Вопрос определяется условиями производства, влиянием типа привода на производительность и, наконец, мощностями двигателей. Так, на мощном прокатном стане (т. е. на одной рабочей машине, а не во всем прокатном цехе) бывает 7 двигателей постоянного тока и 2 двигателя переменного тока. Понятно, что наличие двух родов тока удорожает резерв, канализацию, энергию, условия эксплуатации. Однако общая эксплуатационная стоимость промышленного предприятия с учетом производительности или качества продукции все-таки получается дешевле.

Положим, что в цехе необходимо иметь 50 регулируемых двигателей и 50 нерегулируемых. Первые 50 должны быть взяты на постоянном токе. Однако вторые 50 должны быть оставлены на переменном токе. Для них постоянный ток не нужен, и замена их двигателями постоянного тока повела бы лишь к удорожанию первоначальной и эксплуатационной стоимости за счет преобразования, не давая никаких плюсов кроме упрощения эксплуатации при одном роде тока. Очевидно, что в таких случаях целесообразно применять два рода тока.

Все изложенное выше может быть резюмировано так: 1) в нерегулируемых приводах длительного режима работы следует применять исключительно трехфазный ток; 2) в приводах регулируемых или требующих поддержания постоянства скорости и в приводах повторно-кратковременного режима работы нужно производить сопоставление одного и другого рода тока в отношении технических требований, производительности, первоначальной и эксплуатационной стоимости. Общего ответа на вопрос о роде тока для всех предприятий одной и той же отрасли промышленности не существует. Проблема должна рассматриваться конкретно, применительно к отдельным цехам, к отдельным исполнительным механизмам. Последние с течением времени видоизменяются, меняется и решение вопроса о роде тока для них. В ряде случаев решение вопроса определяется также состоянием техники в отношении производства преобразовательных агрегатов.

Приведенные соображения не дают возможности рекомендовать определенные ответы (рецептуру) на все случаи жизни, т. е. для всех отраслей промышленности и для всех приводов. Для ряда производственных машин, ряда цехов вопрос может быть для данного этапа решен вполне определенно, в отношении ряда других машин применяются двойные решения.

Ниже приводятся краткие соображения о пределах применимости постоянного и переменного тока. Более расширенный разбор вопроса можно найти в труде автора «Применение двигателей в промышленности», ч. III.

134. Краткие соображения о технико-экономических пределах применимости различных систем регулируемого электропривода

В данном параграфе мы коснемся лишь регулируемых электроприводов. Синхронный двигатель практически является нерегулируемым, поэтому применение его в регулируемых электроприводах невозможно. Исключения составляют лишь синхронные электроприводы относительно небольшой мощности в некоторых схемах синхронной связи. В системах Леонарда средней и большой мощности синхронный двигатель играет роль гонного двигателя группы Леонарда.

Простейший самый дешевый асинхронный двигатель имеет два способа регулирования скорости: переключение полюсов и изменение частоты; третий способ—изменение сопротивления в цепи якоря—нашел применение почти исключительно в приводах повторно-кратковременного режима. Там, где регулируемый исполнительный механизм требует ступенчатой регулировки (2—4 ступени), асинхронный двигатель с переключением полюсов является вполне подходящим для целей привода. Наибольшее распространение двигатели с переключением полюсов небольшой мощности нашли в металлорежущих станках, в глубоких насосах нефтяной промышленности. Другие примеры были приведены ранее. Мощные двигатели с переключением полюсов используются также на судах для целей электродвижения.

Регулирование скорости асинхронных двигателей частотой требует специальных преобразователей частоты, которые частично компенсируют преимущества простоты получения переменного тока, ибо подобная система с учетом преобразовательного агрегата в отношении числа машин становится эквивалентной системе Леонарда постоянного тока. К тому же изготовление таких преобразователей частоты на большие мощности оказывается нереальным. Поэтому регулирование асинхронных двигателей изменением частоты применяется лишь для электроприводов небольшой и средней мощности (рольганги, рогулечные ватера, некоторые конвейеры агломерационных фабрик).

Регулирование скорости асинхронных двигателей сопротивле-

нием в цепи ротора при длительном режиме оказывается выгодным при мощностях не выше 200—300 кВт. При этом экономичность пределов регулировки не превышает 20% (1 : 0,8) для механизмов с $M_m = \text{const}$ и 40% (1 : 0,6) — для механизмов с вентиляторным моментом. Таким образом асинхронный двигатель с регулировкой сопротивлением в роторе практически не удовлетворяет условиям большинства регулируемых электроприводов, требующих пределов регулировки скорости обычно не менее 1 : 2. Решение задачи регулирования при мощностях, не превосходящих 300—400 кВт, может быть выполнено двояким путем: 1) применением двигателей постоянного тока; 2) применением коллекторных двигателей.

Регулируемые электроприводы постоянного тока могут изготавливаться на весьма большие мощности порядка нескольких тысяч киловатт и выше. Так, имеются отдельные электроприводы с мощностью в 5 000—10 000 кВт. Однако на такие мощности могут изготавливаться лишь тихоходные двигатели с числом оборотов 50—100 в минуту. Практически двигатели постоянного тока смогли удовлетворить всем требованиям, которые к ним предъявлялись промышленностью. Исключение составляют лишь пределы регулирования свыше 1 : 20. На больший диапазон регулирования, чем указанный, двигатели постоянного тока, питаемые по системе Леонарда, выполнены быть не могут, а потому в случае потребности в больших пределах регулировки (например, в некоторых металлорежущих станках) приходится идти на коробки скоростей или гидравлические передачи (например, типа муфты Дженни или аналогичной ей).

В тех случаях, когда требуются пределы регулирования не выше 1 : 3 (иногда возможно повышение этой цифры до 1 : 4), регулируемые приводы постоянного тока могут быть обслужены шунтовыми и компаундными двигателями. При больших пределах регулирования необходимо переходить на систему Леонарда. Система согласно-встречного включения в чистом виде в современной практике почти не применяется. Система Леонарда неизбежно иногда находит применение и при пределах регулирования меньших 1 : 4, когда устанавливается всего один электропривод постоянного тока или когда ряд шунтовых двигателей, установленных на одном исполнительном механизме, работают почти идентично.

Мощность коллекторных двигателей переменного тока ограничена 75 кВт для репульсионных двигателей, 400 кВт для шунтовых типа Шраге, 700 кВт — для серийных. Последние в таких мощностях не находят применения в промышленном приводе. Нормальные пределы регулирования всех этих двигателей ограничиваются отношением 1 : 3 с возможностью расширения до 1 : 6 и лишь при очень малых мощностях, измеряющихся киловаттами, можно достигнуть соотношения 1 : 10 и даже 1 : 20 (п. 108).

Коллекторные двигатели как будто являются серьезными конкурентами двигателей постоянного тока при мощностях до 400 кВт.

Однако стоимость их и вес значительно выше, чем у двигателей постоянного тока. При установке одного-двух регулируемых электроприводов коллекторные двигатели в ряде случаев имеют экономические преимущества. При большом количестве регулируемых приводов, устанавливаемых в одном месте, экономические преимущества оказываются на стороне двигателей постоянного тока с преобразовательными агрегатами. Это обстоятельство и обусловило в основном относительно малое распространение коллекторных двигателей, отличающихся к тому же более сложной конструкцией вследствие необходимости передвижения щеточного механизма.

В тех случаях, когда пределы регулирования превышают 1:4, современная практика предпочитает использование систем Леонарда. Весьма широкие возможности в смысле диапазона регулирования, варьирования характеристик, прекрасных тормозных и пусковых свойств, даваемые системой Леонарда, и вызвали ее исключительно широкое распространение в практике сегодняшнего дня.

При мощностях электроприводов свыше 300—400 кВт, выше которых коллекторные машины, как двигатели, практически выполнены быть не могут, речь может идти либо 1) о применении каскадных установок, либо 2) о применении двигателей постоянного тока с преобразовательными агрегатами. Практически такие мощности двигателей встречаются главным образом в приводе неревверсивных регулируемых прокатных станков. О применении каскадных установок в таких случаях можно говорить, если пределы регулирования скорости не превосходят отношения 1:1,8. В этом случае при $M_m = \text{const}$ целесообразно применение системы Шербиуса, при $P_m = \text{const}$ — системы Кремера. Такие установки могут выполняться для очень больших мощностей, так как условия работы коллекторной машины в каскаде Шербиуса при постоянной практической скорости значительно легче, чем в качестве двигателя с переменной скоростью. Здесь можно применять коллекторные машины Шербиуса до мощности в 1 000 кВА и при параллельном соединении двух до $2 \times 1\,000$ кВА. В указанных пределах одиночные каскадные установки более экономичны, чем приводы постоянного тока. При пределах регулирования больших, чем 1:1,8, применение приводов постоянного тока для мощных установок становится неизбежным.

Приводы постоянного тока по системе Леонарда оказываются при многодвигательном приводе прокатных станков более экономичными, чем каскадные. Два (и более) регулируемых двигателя постоянного тока с преобразовательным агрегатом Леонарда оказываются выгоднее двух (и более) каскадных установок в силу отладки пусковых реостатов и более простой автоматической аппаратуры управления. Поэтому-то каскадные установки в современной практике утрачивают несколько свое прежнее значение. Вопрос о пределах применимости ионно-электронного привода был рассмотрен выше (п. 100 и 101).

135. Ориентировочные указания по выбору рода тока для электроприводов в различных отраслях промышленности

Ниже даются основные ориентировочные руководящие указания по выбору рода тока для электроприводов на базе нашей и иностранной практики.

Наименование отрасли промышленности	Категория механизмов	Рациональный род тока	Примечания	
Металлургическая	Реверсивные прокатные станы	Постоянный	Система Леонарда-Ильгнера, иногда Леонарда, в будущем возможно питание от ртутных выпрямителей с регулируемой сеткой	
	Нерегулируемые неревверсивные станы	Переменный		
	Регулируемые неревверсивные станы	Постоянный при многодвигательном приводе	Система Леонарда или питание от ртутных выпрямителей с регулируемой сеткой	
	Нерегулируемые клетки неревверсивных станов	Переменный при однодвигательном приводе	Система Кремера или Шербиуса (или система Леонарда)	
	Вспомогательные механизмы повторно-кратковременного режима работы	Постоянный на крупных новых заводах высокой производительности		
	Доменный подъемник и система загрузки доменной печи		Переменный на малых и старых заводах пониженной производительности	Вопрос должен подвергнуться во всех случаях особо тщательному анализу
			Постоянный	

Продолжение

Наименование отрасли промышленности	Категория механизмов	Рациональный род тока	Примечания
Горная	Шахтный подъемник Рудничная откатка электровозами Другие виды рудничной откатки Остальные рабочие машины	Переменный Постоянный Переменный Переменный	Постоянный — как исключение в случае необходимости прибегнуть к системе Леонарда или к ртутному выпрямителю с регулируемой сеткой
Нефтяная		Переменный	В редких случаях бурения — постоянный с системой Леонарда
Металлообрабатывающая	Специальные станки с многодвигательным приводом Станки массового производства Ножицы Прессы и молоты Строгальные станки	Постоянный Переменный (обычно) Постоянный и переменный Переменный Постоянный и переменный	Зависит от типа станка
Текстильная	Подготовительные фабрики Прядильные фабрики Ткацкие фабрики Отделочные механизмы с многодвигательным регулируемым приводом Отделочные механизмы с однодвигательным регулируемым приводом	Переменный Переменный Переменный Постоянный и переменный Постоянный и переменный	
Бумажная	Подготовительные машины Дефибреры Постоянная часть бумагоделательной машины	Переменный То же	

Продолжение

Наименование отрасли промышленности	Категория механизмов	Рациональный род тока	Примечания
Полиграфическая Краны и лифты Силикатная и керамическая Кожевенно-обувная Химическая Пищевая Резиновая	Переменная часть бумагодательной машины	Постоянный	В отдельных случаях переменный [см. Л. 239]
	Отделочные механизмы	Постоянный и переменный	Необходим тщательный анализ
	Многорольные ротационные машины	Постоянный и переменный	
	Остальные машины	Переменный Постоянный и переменный Переменный	
		Тоже	
		»	
		»	
		»	На специальных регулируемых машинах — постоянный

ГЛАВА X

ВЫБОР НЕРЕГУЛИРУЕМОГО ТИПА ДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

136. Постановка задачи

В том случае, когда речь идет о регулируемых установках, приходится решать иногда весьма сложный вопрос о выборе между двигателями постоянного и переменного тока. Соответствующая задача рассмотрена выше. В установках с нерегулируемой скоростью, как ясно из предыдущего, речь может идти лишь о применении двигателей переменного тока.

- Однако в случае нерегулируемых двигателей переменного тока возникает другая задача — выбора электрического типа двигателя. Вообще можно говорить о применении двигателей следующих типов: 1) короткозамкнутого асинхронного; 2) асинхронного с кольцами; 3) синхронного; 4) компенсированного (Гейланда, Осноса); 5) синхронизированного с самовозбуждением (Шюлера, Финна); 6) синхронизированного с отдельным возбудителем (Данфильсона); 7) асинхронного с компенсатором фаз.

Выбор между этими типами двигателей должен быть сделан на базе их технико-экономического сравнения в отношении электрических и механических свойств, в отношении первоначальной стоимости самих двигателей и аппаратуры и в отношении к. п. д. (расхода энергии и полной эксплуатационной стоимости). Задача усложняется благодаря зависимости стоимости энергии от $\cos \varphi$. В этом отношении двигатели высокого $\cos \varphi$ имеют несомненные преимущества перед двигателями низкого $\cos \varphi$.

В период примерно до мировой войны 1914 г. рассматриваемой задачи практически не существовало. Двигатели высокого $\cos \varphi$ (кроме синхронизированного с отдельным возбудителем) не были достаточно усовершенствованы. Самой проблеме $\cos \varphi$ тогда еще не придавалось надлежащего значения. Европейская практика шла главным образом по пути применения двигателей с кольцами. Короткозамкнутые двигатели в Европе допускались лишь очень малых мощностей по условиям питания осветительных приемников и двигателей от общих сетей при сравнительно маломощных под-

станциях. Лишь американская практика, имея более мощные станции, использовала короткозамкнутые двигатели довольно широко.

Последние два десятилетия сильно изменили пределы применимости различных типов двигателей переменного тока. Как у нас, так и за границей энергия стала оплачиваться в зависимости от соф. Были доведены до высокой степени совершенства пусковые и рабочие характеристики синхронных двигателей, усовершенствованы типы короткозамкнутых двигателей (усовершенствованы двигатели Бушера и двигатели с глубоким пазом) и расширены пределы их максимальных мощностей в связи с увеличением мощности подстанции; появились различные типы компенсированных и синхронизированных двигателей и компенсаторов фаз.

На очередь уже давно стал вопрос об отборе из этих типов двигателей лучших или во всяком случае о разграничении экономических пределов их применимости. Заграничная практика (кроме американской) этому вопросу в целом не уделила и до сих пор не уделяет достаточного внимания.

Проще всего эта проблема была решена в США, где применяют почти исключительно три первых из указанных выше типов двигателей: короткозамкнутый, асинхронный с кольцами, синхронный. Американские фирмы совершенно не производят других регулируемых типов двигателей переменного тока. Исключение составляет фирма Вагнер Электрик Компани, выпускающая синхронизированный двигатель с самовозбуждением типа Финна. Европейские электромашиностроительные фирмы изготовляют все указанные выше типы двигателей.

Несомненно, что среди перечисленных типов двигателей по техническим характеристикам есть худшие и есть лучшие. Соответственно по первоначальной стоимости—одни дешевле, другие дороже. В эксплуатации точно так же различные типы двигателей неравноценны.

При таких условиях также несомненно, что изготовлять на наших заводах все семь указанных типов двигателей нецелесообразно, ибо увеличение числа выпускаемых типов удорожает производство двигателей. Подсчет степени удорожания вообще очень затруднителен, но возможен. В отношении удовлетворения основных требований производственных машин большинство этих типов двигателей равноценны. Следовательно, мы должны выдвинуть ряд типов двигателей как основных, часть типов может быть исключена совсем, как более дорогие или менее совершенные, и, наконец, ряд типов двигателей может нуждаться еще в дальнейшем изучении. Настоящая глава и ставит себе целью, поскольку это возможно, дать ответ на последние вопросы.

Прежде чем переходить к сравнению отмеченных выше типов двигателей, кратко коснемся главнейших важных для привода свойств наиболее распространенных двигателей короткозамкнутого и синхронного.

137. Краткая характеристика современных типов короткозамкнутых двигателей

Асинхронный короткозамкнутый двигатель является по конструкции самым простейшим типом двигателя и самым дешевым. Конструкция его ротора такова, что при эксплуатации она почти не требует ухода, если беличье колесо ротора выполнено достаточно надежно. Возможности повреждения ротора минимальны, нет контактных колец, нет щеток, нет щеткодержателей. Ремонт ротора в эксплуатации сводится лишь к сварке, запайке или заливке стержней ротора в случае недостаточно тщательного изготовления двигателя на заводе или в случае неправильно выбранной (недостаточной) мощности двигателя. Преимущества короткозамкнутого ротора перед другими типами роторов или якорей неоспоримы.

К этому присоединяется исключительная простота по обслуживанию этого двигателя, не требующего в большинстве случаев практики никаких добавочных пусковых приспособлений, кроме рубильника или автоматического выключателя («магнитного пускателя»).

Огромное экономическое преимущество короткозамкнутого двигателя перед двигателем с фазным ротором заключается в его низкой стоимости. Отпадение контактных колец, укорочение вала уже значительно удешевляют двигатель. Весьма сильно сказывается отсутствие пускового реостата. В двигателях малой мощности стоимость реостата почти равна стоимости самого двигателя, а в двигателях средней мощности составляет 20% от их стоимости.

В случае автоматического управления аппаратура короткозамкнутого двигателя сводится лишь к магнитному пускателю, который содержит только трехполюсный контактор для включения и выключения и термическое реле.

Автоматическая аппаратура двигателя с кольцами значительно более сложна и включает кроме пусковых сопротивлений большое число контакторов для их замыкания и блокировочные контакты, исключающие возможность пуска двигателя без реостата и обуславливающие последовательность вывода сопротивлений из цепи ротора. Примерные соотношения стоимости двигателей короткозамкнутых и с фазным ротором даны ниже.

Сравнительная стоимость в процентах короткозамкнутого и фазного двигателей при средних мощностях

Тип управления	Двигатель с кольцами с реостатом	Двигатель с короткозамкнутым ротором	
		непосредственное включение	включение $\lambda - \Delta$
Ручное управление	100	75	85
Автоматическое управление	130	80	105

Приведенные соображения показывают исключительные технико-экономические преимущества короткозамкнутых двигателей. К этому нужно еще добавить, что короткозамкнутый двигатель имеет более высокий $\cos \varphi$ (из-за меньшего междужелезного пространства и меньшей длины лобовых соединений ротора) и лучший к. п. д.

Распространению короткозамкнутых двигателей препятствовал один существенный недостаток, который играл большую роль при ограниченных мощностях электрических станций и подстанций прежнего времени. Этот недостаток заключался в большом толчке тока при пуске от полного напряжения, достигавшем пяти-семикратной величины по отношению к номинальному при ограниченной величине пускового момента,

Большая величина пускового тока вызывается малым сопротивлением ротора. Повышение величины последнего сильно снижает к. п. д. двигателя. Что же касается величины начального пускового момента двигателя и формы его изменения при разгоне, то они определяются соотношением и характером изменения активного и реактивного сопротивлений.

Мы здесь сталкиваемся с антагонизмом нескольких факторов — пускового и максимального вращающего моментов, пускового тока и к. п. д. Увеличение активного сопротивления ротора R_2 при данном x_2 влечет увеличение пускового момента, снижает пусковой ток, но снижает и к. п. д. двигателя. В свою очередь увеличение x_2 при данном R_2 , вызывая уменьшение пускового тока, снижает максимальный и пусковой моменты, уменьшает $\cos \varphi$. При конструировании приходится идти на компромиссы для того, чтобы заставить двигатель удовлетворить всем условиям, требуемым исполнительными механизмами, подстанцией и экономической стороной дела.

Эти последние требования вызвали ряд видоизменений конструкций простого короткозамкнутого двигателя.

Соответственно короткозамкнутые индукционные двигатели могут быть разделены на две основные категории: а) обыкновенные и б) с пониженным пусковым током. Эта последняя категория в свою очередь имеет два подразделения: двигатели Бушера и двигатели с глубоким пазом. Особо нужно выделить короткозамкнутые двигатели с переключением полюсов, усложненные соединением обмоток в статоре. Однако мы их здесь, как регулируемых (со ступенчатой регулировкой), касаться не будем. Нас здесь будут интересовать свойства короткозамкнутых двигателей лишь в отношении вращающих моментов, пусковых токов и, наконец, $\cos \varphi$.

Каждый тип короткозамкнутого двигателя имеет более или менее определенные значения пусковых токов и определенную форму кривой вращающего момента, вызываемые технико-экономическими требованиями (электромагнитными свойствами и экономичностью). При этом на характеристики двигателя сильно влияют примененные материалы для обмотки ротора. Почти каждый завод

для каждой мощности дает особые кривые моментов. Говорить широко об универсальной характеристике для какого-либо определенного типа двигателей (обыкновенного или Бушера или с глубоким пазом) на разные скорости и мощности обычно не приходится. К тому же эти характеристики вообще можно очень сильно варьировать при конструировании применительно к требованиям производственных машин. В настоящее время нашими заводами строятся все типы короткозамкнутых двигателей для мощностей от долей киловатта до нескольких тысяч киловатт.

Конструируемые нашими заводами типы короткозамкнутых двигателей непрерывно изменяются. Поэтому дать здесь полную сводку короткозамкнутых двигателей в изготовлении заводов СССР несколько затруднительно.

Еще несколько лет тому назад двигатели средней мощности строились заводом «Электросила» им. С. М. Кирова преимущественно по типу Бушера, двигатели с глубокой впадиной изготовлялись в меньшем количестве. В последнее время по условиям более простого изготовления завод предпочитает для средних и больших мощностей выпускать двигатели с глубоким пазом, оставляя за двигателями Бушера лишь специальные случаи применения в промышленности.

Таблица XIV

Значение пусковых моментов и токов для короткозамкнутых двигателей

Тип короткозамкнутого двигателя	$k_M = \frac{M_{pp}}{M_N}$		$k_I = \frac{I_{pp}}{I_N}$	
	включение на полное напряжение	включение $\lambda - \Delta$	включение на полное напряжение	включение $\lambda - \Delta$
Обыкновенный	0,8 — 1,7	0,27 ÷ 0,57	6 ÷ 7	2 ÷ 2,3
С двойным пазом (Бушера)	1 ÷ 3	0,33 ÷ 1	3 ÷ 5	1 ÷ 1,67
С глубоким пазом	1,2 ÷ 1,6	—	3,4 ÷ 4,5	—

Серия двигателей АТ, выпускаемая заводом «Электросила», имеет при мощности до 100 кВт кратность пускового тока 4—5 при кратности пускового момента 1,5—1,6.

Двигатели типа ВАТО завода «Электросила» им. С. М. Кирова для мощностей до 400 кВт имеют $k_M \approx 1$ и $k_I \approx 4$.

Выпускаемый в настоящее время нашими заводами тип АА имеет следующие пусковые данные.

Таблица XV

Мощность в кВт	Синхронное число об/мин	k_I	k_M
1,6—12	3 000	7,1—8,3	2,2—3,2
1,0—10	1 500	4,7—6,7	1,9—2,7
0,55—6	1 000	4,9—6,4	1,4—2,0

Американские типичные двигатели Бушера имеют следующие соотношения моментов и пусковых токов, представленные в табл. XVI.

Таблица XVI

Мощность в kW	k_M	k_I
11—22	2,25—2,5	4,5
30—75	1,75—2,0	4,5
90 и выше	0,75—1	4—4,5

В двигателях Бушера с мощностью до 100 kW, изготовляемых на наших заводах, получаются следующие зависимости между кратностью пускового момента k_M и кратностью пускового тока k_I :

$$\begin{array}{ccc} k_M & 1,0 & 1,5, & 2,0 \\ k_I & 3,2—3,5 & 3,5—3,8 & 4,5—5,0 \end{array}$$

В двигателях мощностью от 300 до 1000 kW:

$$k_M=1,0 \text{ при } k_I=4—6.$$

Коэффициент мощности и к. п. д. крупных двигателей Бушера соответствуют нормам для двигателей с кольцами. В двигателях до 100 kW к. п. д. соответствует нормам для короткозамкнутых двигателей.

Коэффициент мощности двигателей Бушера несколько ниже значений, установленных нормами: для тихоходных двигателей $\cos \varphi_B = \frac{1}{5}(6 \cos \varphi_a - 1)$; для двигателей при $n_0 = 1500 \div 3000$ об/мин $\cos \varphi_B = \frac{1}{4}(5 \cos \varphi_a - 1)$, где $\cos \varphi_a$ — коэффициент мощности нормального короткозамкнутого двигателя той же мощности.

В двигателях с глубоким пазом малой мощности (до 13 kW):

$$\frac{M_{pp}}{M_N} = 1,4 \div 2,0 \text{ при } \frac{I_{pp}}{I_N} = 4 \div 5.$$

В двигателях больших мощностей

$$\frac{M_{pp}}{M_N} = 1,2 \div 1,4 \text{ при } \frac{I_{pp}}{I_N} = 4 \div 5.$$

Перегрузка $\lambda_M = \frac{M_{\max}}{M_N}$ равна приблизительно 2 для двигателей с $\cos \varphi > 0,85$ и 1,75 для двигателей с $\cos \varphi < 0,85$.

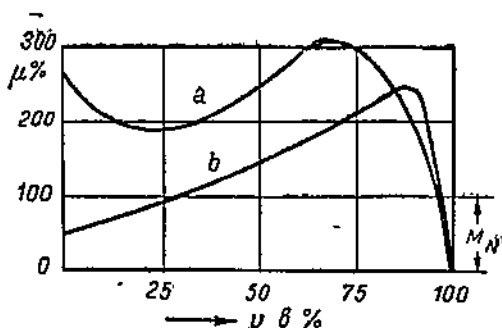
На фиг. 345 представлены типичные кривые моментов для обыкновенного короткозамкнутого двигателя с круглыми стержнями мощностью в 2 kW (кривая *a*) и в 50 kW (кривая *b*).

Характер кривой вращающего момента двигателя меньшей мощности для практических целей вообще более подходит, чем характер кривой двигателя большей мощности. Дело в том, что в большинстве рабочих машин трение покоя больше трения движения. Как только привод возьмет с места, трение уменьшается. Поэтому кривые вращающих моментов двигателей малой мощности более благоприятны. Причины отличия кривых моментов двигателей малой и средней мощностей заключаются в следующем. В двигателях малой мощности активное сопротивление можно делать относительно большим, так как при этом к. п. д. вследствие меньшей его величины не снижается в них так, как у больших двигателей. Поэтому-то в малых двигателях и можно получать высокое значение пускового момента. В нормальных короткозамкнутых двигателях удается получать кратности пускового момента

$k_M = \frac{M_{pp}}{M_N}$ значения, представленные в табл. XVII.

Таблица XVI

Мощность двигателя в kW	k_M
до 0	1,7
1—4,5	1,5
4,5—14,5	1,3
14,5—40	1,0
40—100	0,8



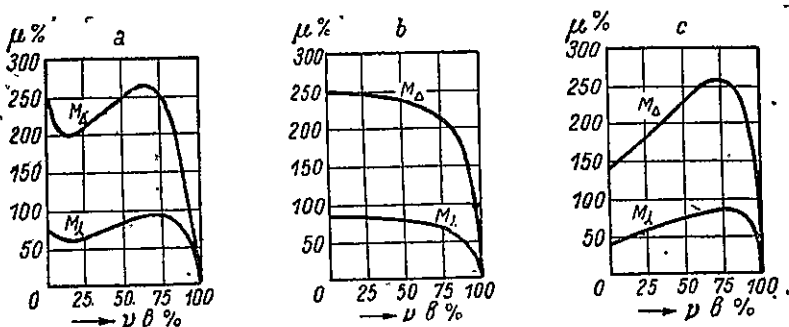
Фиг. 345. Типичные кривые вращающих моментов для короткозамкнутых двигателей в 2 kW и 50 kW.

Сопоставление кривых вращающих моментов трех основных категорий короткозамкнутых двигателей дано на фиг. 346. На фиг. 347 приведены формы кривых моментов короткозамкнутых двигателей, применяемых в США для металлорежущих станков.

Выбор того или иного типа короткозамкнутого двигателя для рабочих машин должен делаться при учете всех факторов. По существу он должен базироваться на учете величин пусковых токов, формы кривых вращающих моментов, к. п. д. и первоначальной стоимости.

Первоначальную стоимость различных типов короткозамкнутых двигателей практически следует считать одинаковой. Точно так же не слишком большую роль играют к. п. д. и $\cos \varphi$, имеющие в

двигателях Бушера и в двигателях с глубоким пазом несколько уменьшенные значения по сравнению с обыкновенным короткозамкнутым двигателем. При выборе главное внимание должно быть

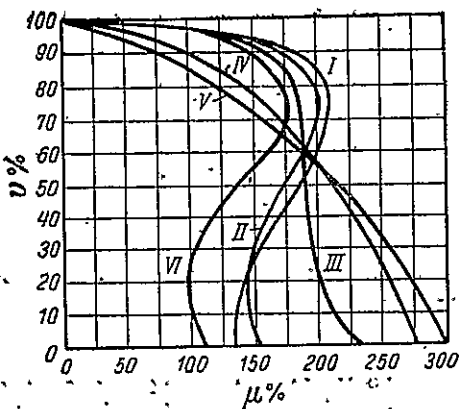


Фиг. 346. Сопоставление кривых M трех типов короткозамкнутых двигателей:

a —обыкновенный; b —Бушера; c —с глубоким пазом.

уделено величинам пусковых токов и форме кривой вращающих моментов. В выпускаемых в настоящее время нашими заводами двигателях с повышенным скольжением (типа МТС, см. § 39)

вопрос о достаточности перегрузочного и пускового момента утрачивает свое значение, так как в них отношение $\frac{M_{\max}}{M_N} = 2,8-5,3$. Пус-



Фиг. 347. Кривые американских короткозамкнутых двигателей для металлорежущих станков.

I —нормальная кривая; II —уменьшенный пусковой ток; III —повышенный пусковой момент; IV, V —с повышенным скольжением; VI —для деревообрабатывающих станков с плавным пусковым моментом.

станции. Форма кривой вращающего момента определяет условия разгона машины, ее ускорение и время пуска в ход. Выбор двигателя с неподходящей формой кривой момента может повести к значительным ускорениям в отдельный период при сильных тол-

ковой момент этих двигателей примерно совпадает с максимальным. Современная практика часто ограничивает мощность обыкновенных короткозамкнутых двигателей 10 kW, при больших мощностях заводы переходят на двигатели Бушера и двигатели с глубоким пазом.

Величина пускового тока имеет значение, очевидно, лишь с точки зрения влияния на напряжение под-

ках в исполнительном механизме и передачах с соответствующими последствиями.

Из уравнения движения привода следует, что ускорение при пуске

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_d - M_m}{J}$$

и время пуска

$$t = \int_{\omega=0}^{\omega=\omega_s} \frac{J}{M_d - M_m} \cdot d\omega,$$

где ω_s — установившаяся скорость двигателя, соответствующая M_m .

Отсюда совершенно ясно, что выбор того или другого типа короткозамкнутого двигателя зависит от характера кривой статического момента рабочей машины $M_m = (f\omega)$ и от величины приведенного момента инерции J .

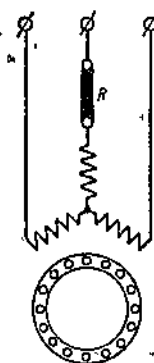
В простейших условиях при малом пусковом моменте и малом моменте инерции можно удовлетвориться (если позволяет толчок тока) простым короткозамкнутым двигателем. При более тяжелых условиях необходимо прибегать к двигателю Бушера или двигателю с глубоким пазом. Этот последний конструктивно проще и дешевле, чем двигатель Бушера. Поэтому во всех случаях, где требуется уменьшенный пусковой ток и не требуется высокого пускового момента, следует предпочесть двигатель с глубоким пазом. Лишь в случае высокого пускового момента нужно прибегать к двигателю Бушера.

В случае механизмов с постоянным моментом сопротивления (например, поршневые насосы, поршневые компрессоры) более подходит двигатель с глубоким пазом и непосредственным включением в сеть. Этот двигатель дает плавное ускорение механизма.

Механизмы с вентиляторным моментом не требуют большого пускового момента (обычно не больше 20—25%) и могут удовлетвориться простым типом короткозамкнутого двигателя. Сложнее дело обстоит в случае центробежного насоса, часто пускаемого при открытом напорном вентиле. Здесь требуется больший момент. Больше в данном случае подходит двигатель с глубоким пазом и непосредственным включением в сеть. В ряде случаев можно удовлетвориться и пониженным моментом путем включения двигателя с глубоким пазом при пуске на λ . Двигатель Бушера с непосредственным пуском в данном случае нежелателен, так как вызывает значительный ускоряющий момент.

В случае механизмов длительного режима работы с тяжелым условием пуска возможно применение как двигателя с глубоким пазом, так и двигателя Бушера. Самые производственные машины и условия их пуска настолько разнообразны, что давать какие-либо общие указания в этом отношении не представляется возможным. Лишь детальное сопоставление характеристик машины к характеристикой двигателя может дать нужное заключение, ибо

одни условия будут в ленточных транспортерах или цепных дорогах, другие—в качающихся конвейерах, третьи—в мельницах и дробилках и т. д. При выборе типа двигателя в отношении вращающего момента в ряде случаев приходится учитывать влияние на момент двигателя возможных падений напряжения и колебаний частоты сети. В среднем можно считать, что повышение напряжения на 10% повышает пусковой и перегрузочный моменты на 21%, снижение же напряжения на 10% снижает те же величины на 19%. Что же касается частоты, то изменение ее в ту или другую сторону при неизменном напряжении на 5% влечет изменение момента в обратном направлении (т. е. при уменьшении частоты—увеличение момента) примерно на 10%.



Фиг. 348. Схема для ограничения пускового тока короткозамкнутого двигателя.

Большие пусковые токи короткозамкнутых двигателей повели к тому, что в прежнее время было предложено много различных конструкций центробежных шкивов, которые, сцепляя двигатель с исполнительным механизмом после разгона двигателя до некоторой скорости, обуславливали меньшую длительность максимального толчка тока. В связи с увеличением мощности станций и улучшением характеристик двигателей центробежные шкивы потеряли ныне практическое значение.

Однако необходимость снижения напряжения на зажимах короткозамкнутого двигателя во время пуска все-таки в ряде случаев остается. Это снижение оказывается желательным иногда по условиям ограничения пускового тока, иногда по условиям ограничения пускового момента. Снижение последнего может стать необходимым, когда требуется плавность пуска производственного агрегата в ход во избежание его поломки или нарушения производственного процесса. Подобные обстоя-

тельства имеют значение для отдельных текстильных машин (банкаброши, кардочесальные машины), некоторых металлорежущих станков, шлюзовых подъемников, лебедок. В последних при резких толчках момента может иногда иметь место разрыв троса.

Для снижения пускового момента или пускового тока в современной практике применяют: 1) автотрансформаторы; 2) включение активных и реактивных сопротивлений в цепь статора; 3) реже переключение обмоток статора с треугольника на звезду. Весьма часто для этой цели теперь используют схему фиг. 348 с несимметричным включением активного сопротивления в одну фазу статора. Такой способ для многих случаев практически оказывается наиболее простым и дешевым. Законы изменения токов и моментов в этой схеме, как и во всякой другой несимметричной, могут быть получены на базе метода симметричных составляющих [Л. 241].

138. Краткие сведения о пусковых свойствах синхронного двигателя

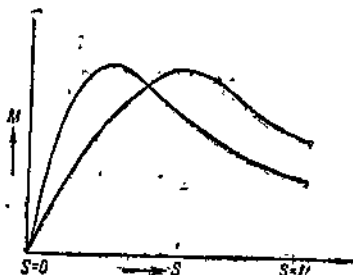
Синхронный двигатель стал находить широкое распространение в промышленности для нерегулируемых электроприводов с 1918—1920 гг. в первую очередь в США, в связи с усовершенствованием его пусковых свойств в качестве асинхронного и в связи с повышением перегрузочной способности. Так, в двадцатых годах текущего столетия некоторыми американскими станциями были введены правила, согласно которым все приключаемые к их сетям нерегулируемые двигатели мощностью свыше 75 кВт должны быть синхронного типа. Промышленные синхронные двигатели в США изготавливаются для мощностей от 20 до 6 700 кВт и скоростей вращения от 3 600 до 60 об/мин. Наибольшее число установок относится к мощности от 75 до 375 кВт и скоростям от 90 до 1 000 об/мин. У нас в СССР синхронные двигатели начали широко конструироваться примерно с 1930 г.

Конструкция современного синхронного двигателя — это компромисс между перегрузочной способностью машины, с одной стороны, и между пусковым (при $s=1$) и подсинхронным (при $s=0,05$) моментами, — с другой. Пусковой момент должен быть достаточным для того, чтобы машина могла взять с места. Подсинхронный момент должен быть достаточным для того, чтобы электропривод под влиянием асинхронного момента мог дойти до скольжения $s=0,05$. Лишь при этом условии двигатель сможет синхронизироваться под влиянием включения постоянного тока в обмотку возбуждения.

Большая перегрузочная способность синхронного двигателя требует большего междуфазного пространства и малой реакции якоря. Выполнение этих условий повышает намагничивающий ток и понижает пусковой момент. В свою очередь, как вообще в асинхронных машинах, повышение подсинхронного момента двигателя влечет за собой понижение пускового и обратно (фиг. 349).

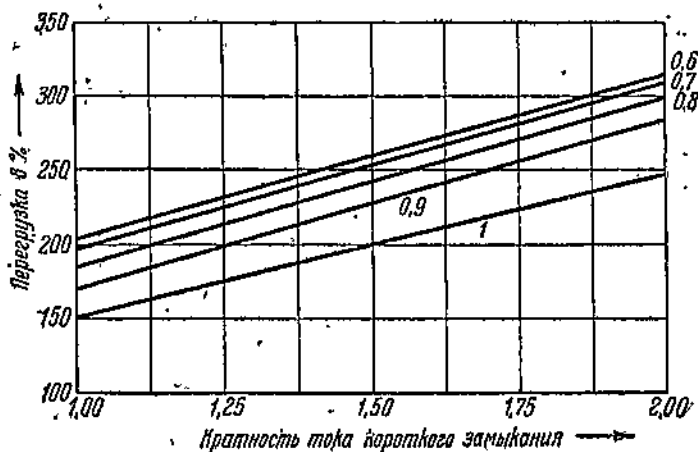
Величины вращающих моментов, развиваемых современными синхронными двигателями, и их пусковые кВА зависят от номинального числа оборотов двигателей в минуту. Быстроходные двигатели и в частности турбодвигатели имеют вообще лучшие пусковые характеристики в отношении моментов, но вызывают большие толчки, чем тихоходные.

Перегрузочный момент стандартных американских синхронных двигателей для машин с числом полюсов от 4 до 30 составляет



Фиг. 349. Кривые асинхронных моментов синхронного двигателя для двух сопротивлений пусковых обмоток.

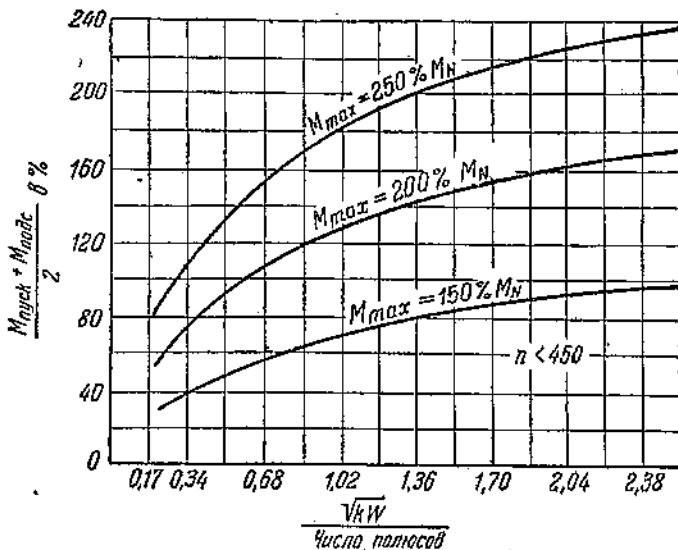
250% номинального. Устойчивость этих двигателей такова, что они могут работать при частоте на 20% ниже номинальной. Качаний при этом не возникает. Увеличивая количество меди на полюсах, т. е. увеличивая размеры машины, можно довести перегрузочную способность до 300—350% и даже до 400%, конечно, за счет удорожания двигателя. Зависимость перегрузочной способности синхронных двигателей от кратности тока короткого замыкания для двигателей различного $\cos\varphi$ (при упреждающем токе) представлена на фиг. 350.



Фиг. 350. Зависимость перегрузочной способности синхронного двигателя от кратности тока короткого замыкания.

Что же касается значений пусковых и подсинхронных моментов, то о них можно сказать следующее. Двигатели всех скоростей, при пуске от 80% номинального напряжения могут развивать пусковой момент в 100—150% от номинального при подсинхронном моменте в 15—25%. Двигатели на скорость в 150 об/мин при тех же условиях могут развивать пусковой момент в 35% при подсинхронном в 90%. Двигатели более низких скоростей при тех же условиях могут развивать подсинхронный момент в 50% при пусковом — в 35%. Наибольшие трудности представляет получение высокого подсинхронного момента.

На фиг. 351 даны достижимые значения $\frac{M_{\text{пуск}} + M_{\text{подс}}}{2}$ (полу- суммы пускового и подсинхронного моментов) в процентах от M_N для двигателей с различной перегрузочной способностью M_{max} для числа оборотов в минуту $n < 450$ об/мин в зависимости от $\frac{V}{\sqrt{kW}}$ для американских явнополюсных двигателей. Указанная выше полусумма моментов взята ввиду их взаимной связи при конструировании.



Фиг. 351. Зависимость $M_{\text{пуск}}$ и $M_{\text{подс}}$ от мощности синхронного двигателя для разных перегрузок.

Фирма GEC дает следующие данные вращающих моментов для стандартных синхронных двигателей общего применения, под которыми понимаются двигатели с мощностью от 0,75 до 150 kW при числе оборотов в минуту 450 и больше.

Таблица XVIII

Значения вращающих моментов в процентах от номинального при пуске от полного напряжения

Момент	Число об/мин	При номинальном $\cos \varphi$	
		$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,8$ упреждающий
Пусковой	1 200	195	165
"	900	125	155
"	720	120	150
Подсинхронный	Все	100	125
Перегрузочный	"	175	250

В этих двигателях при скоростях от 240 до 450 об/мин пусковые kVA при номинальном напряжении составляют 300% номинальных kVA, при $n < 240$ об/мин — 250%. Двигатели более высоких скоростей, чем $n = 450$ об/мин, в тех же условиях требуют (400—700%) kVA. Пусковые kVA двигатели большей скорости выше, так как реактивное сопротивление таких двигателей меньше. Например, одинаковые пусковые kVA получаются при пуске двигателя на 100 об/мин от 100% номинального напряжения и при

пуске двигателя на 600 об/мин от 80% номинального напряжения. Очевидно, что в отношении пусковых точков тока синхронный двигатель при асинхронном пуске приближается к короткозамкнутому.

В свою очередь, различные исполнительные механизмы предъявляют к синхронным двигателям следующие требования в отношении пусковых и подсинхронных моментов.

Наиболее давно синхронные двигатели применяются на поршневых компрессорах. Эти механизмы требуют от синхронных двигателей начального пускового момента в 40%, подсинхронного от 40 до 95% и перегрузочного в 140%. Такие величины моментов удовлетворяют все типы компрессоров.

Фирма Westinghouse считает нормальные цифры моментов для поршневых компрессоров: пусковой — 50%, подсинхронный — 40% и перегрузочный — 150%. При этом пусковые kVA получают в 275%. Возможно выполнение двигателей с $M_{пуск} = 100\%$, $M_{подс} = 50\%$ и $M_{пер} = 425\%$ при пусковых kVA в 425%.

Компрессоры двойного действия для угольной кислоты требуют пусковой момент от 70 до 90% и подсинхронный — в 45%. Двухцилиндровые компрессоры двойного действия с кривошипами под углом 90° требуют пусковой момент в 55—60% и подсинхронный — в 40%.

Для некоторых компрессоров, в которых уменьшения давления газа возможно достигнуть лишь снижением скорости, применяют иногда синхронные двигатели с переключением полюсов с двумя скоростями. Пусковой ток таких двигателей не достигает больших значений, а потому их можно пускать от полного напряжения. Так, американские двухскоростные двигатели на 2200 V, 60 Hz, 240/450 об/мин при пуске от полного напряжения и включении на 450 об/мин берут максимальную силу тока в 300%, при включении на 240 об/мин — 250%.

Центробежные компрессоры требуют $M_{пуск} = 50\%$, $M_{подс} = 100\%$, $M_{пер} = 150\%$. При этих условиях пусковые kVA получают в 500%. Возможно вообще выполнить двигатели на 164 об/мин при $M_{пуск} = 190\%$, $M_{подс} = 110\%$ при пусковых kVA в 650%.

Меньшее распространение синхронные двигатели нашли в резиновой промышленности для привода гладких и рифленых вальцов, смесителей Бенбери.

Особенность работы резиновых вальцов заключается в очень резких перегрузках порядка 300—400% от номинальной. Эти обстоятельства побуждают устанавливать часто один двигатель на несколько вальцов. Пусковой ток таких двигателей при пуске от полного напряжения составляет 450—650%.

Наиболее мощные приводы синхронных двигателей установлены на прокатных станах.

Характеристики требуемых моментов для станков, а также для некоторых других механизмов приведены в табл. XIX,

Таблица XIX

Характеристики моментов синхронных двигателей для различных исполнительных механизмов

№ по пор.	Наименование механизма	Требуемые моменты в %		
		пусковой	подсинхронный	перегрузочный
1	Непрерывные заготовочные станы, рельсовые, крупносортовые станы	50—100	40	250—350
2	Листовые станы дуо	50—100	40	300—450
3	Холодная прокатка дуо	150—200	100—150	250
4	Трубопрокатные станы	50—100	40	250—350
5	Турбовоздуходувные	25—30	45—60	250
6	Мельницы Жордана	50	40	200
7	Центробежные насосы	50—60	100	200
8	Трансмиссии	100—125	60—100	200
9	Цементные мельницы	100—150	100	250
10	Двигатель-генераторы	20—30	15—25	200

139. Классификация пусковых схем для асинхронного пуска синхронных двигателей

Почти все современные синхронные двигатели без исключения пускаются в настоящее время в качестве асинхронных. Стремление иметь в установках синхронные двигатели с достаточным пусковым и подсинхронным моментами при ограниченной силе пускового тока (последнее условие фиксируется мощностями питающих подстанций) вызвало к жизни целый ряд пусковых схем и несколько специальных конструкций синхронных двигателей.

Существующие схемы пуска могут быть в основном подразделены следующим образом:

- 1) пуск от полного напряжения;
- 2) пуск через автотрансформатор;
- 3) пуск через катушку самоиндукции (реактор);
- 4) пуск через активное сопротивление;
- 5) пуск от полного напряжения с переключением статорных обмоток, метод Хиббарда (Hibbard);
- 6) пуск с включением части статорной обмотки;
- 7) пуск с повышением напряжения путем последовательного включения с емкостью;
- 8) пуск с разомкнутой обмоткой возбуждения;
- 9) пуск с приключенным возбудителем [Л. 242].

В качестве специальных конструкций синхронного двигателя в американской промышленности применяются:

- 1) двигатель с электромагнитной муфтой;
- 2) двигатель с вращающимся статором; название фирмы GEC — «super-synchronous motor» (чрезмерно синхронный);

3) двигатель с фазной пусковой обмоткой; название фирмы Westinghouse — „Simplex motor“ (упрощенный).

Эти последние три конструкции в нашей практике значения не имеют, поэтому мы их касаться далее не будем.

Все перечисленные выше схемы пуска и конструкции синхронных двигателей отличаются одна от другой различным значением коэффициента эффективности пуска, т. е. различным отношением пускового момента к пусковому току. Схема 2 дает почти такое же значение коэффициента эффективности пуска, как и 1. Соотношение

$\frac{M_{\text{пуск}} \text{ в процентах от } M_N}{kVA_{\text{пуск}} \text{ в процентах от } kVA_N}$ составляет при схеме 2 для

двигателей низких скоростей с номинальным $\cos \varphi = 1$ в среднем — 0,22, то же для двигателей высоких скоростей — 0,28.

Схемы 3, 4, 5 дают снижение коэффициента эффективности пуска, так как пусковая сила тока падает пропорционально с уменьшением напряжения, пусковой же момент двигателя падает пропорционально квадрату напряжения. Наоборот, схемы 7 и 8 и специальные конструкции дают повышенное значение коэффициента эффективности пуска, доходящее до 1 в двигателе с электр магнитной м. ф. и до 0,6—0,7 в двигателе с фазной пусковой обмоткой. Схема 8 дает повышение коэффициента эффективности примерно на 15% по сравнению со схемами 3, 4 или 5 для двигателей низких скоростей и примерно на 30% — для двигателей высоких скоростей.

Необходимо, однако, отметить, что далеко не все схемы могут быть использованы во всех случаях. Пределы применимости каждой из них различны и определяются типом привода и мощностью питающей подстанции.

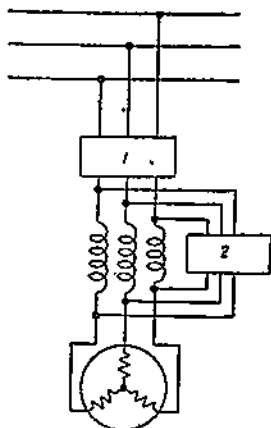
Многочисленность существующих схем объясняется как различными условиями работы электроприводов в промышленных предприятиях, так и тем, что различные американские фирмы, усовершенствуя способы пуска синхронных двигателей, дали различные решения. Краткий технический анализ работы главных схем дан ниже.

Наша практика применяет исключительно схемы 1, 2, 6 и 9.

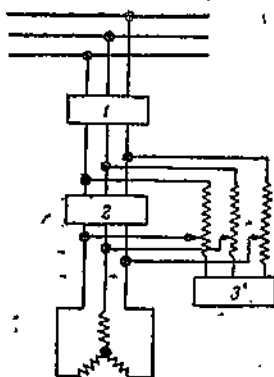
ХЭМЗ в последнее время запроектированы три новых серии автоматического управления синхронными двигателями [Л. 244]: 1) для высоковольтных двигателей общего применения (насосы, компрессоры, двигатель-генераторы); 2) для высоковольтных двигателей с резко меняющейся нагрузкой (прокатные станы); 3) для низковольтных двигателей. При этом различается легкий и тяжелый пуск привода. При легком пуске ток возбуждения подается двигателю при пониженном напряжении на зажимах статора; при тяжелом пуске ток возбуждения подается после переключения статорных обмоток двигателя на полное напряжение.

140. Пуск синхронных двигателей через реактор или автотрансформатор и их сравнение

Снижение напряжения на зажимах синхронного двигателя при пуске для уменьшения силы пускового тока чаще всего делается двумя способами: 1) с помощью последовательного включения с двигателем во время пуска реактора (фиг. 352) или 2) включением двигателя на сеть во время пуска через автотрансформатор (фиг. 353). Поскольку синхронные двигатели применяются на прак-



Фиг. 352. Пуск синхронного двигателя через реактор.



Фиг. 353. Пуск синхронного двигателя через автотрансформатор.

тике при мощностях примерно с 70 kW, т. е. такой мощности, на которую в большинстве случаев уже рационально конструировать двигатели на высокое напряжение в 3 и 6 kV, то мы в дальнейшем все схемы будем показывать с масляными выключателями.

При пуске по схемам фиг. 352 и фиг. 353 двигатель включается в сеть посредством масляников 1 (фиг. 352) или 1 и 3 (фиг. 353). По достижении скорости, близкой к синхронной, двигатель переключается на номинальное напряжение масляниками 2.

Пусковая аппаратура при пуске с реактором всегда стоит меньше, чем при пуске с автотрансформатором, как за счет более высокой стоимости автотрансформатора, так и за счет добавочного масляника. С этой точки зрения желательно всегда стремиться применять пусковую схему с реактором. Однако имеются факторы, которые в ряде случаев делают невозможным применение схемы с реактором и обуславливают необходимость использования автотрансформатора. Причины этого заключаются в том, что автотрансформатор дает нам большее снижение силы пускового

тока в сети, чем реактор; при одном и том же вращающем моменте двигателя. Выясним эти обстоятельства.

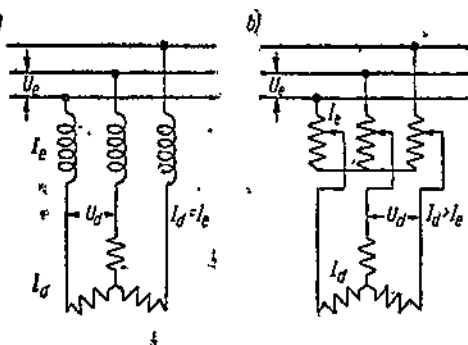
Пусть при пуске двигателя от полного напряжения последний развивает вращающий момент M_{pp} . Если мы напряжение на зажимах двигателя снизим посредством реактора в два раза, то вращающий момент двигателя при этом снизится в четыре раза:

$$M'_{pp} = M_{pp} \cdot \left(\frac{U_p}{U_N} \right)^2 = M_{pp} \left(\frac{0,5U_N}{U_N} \right)^2 = \frac{M_{pp}}{4},$$

так как момент асинхронного двигателя, каковым является синхронный двигатель при пуске, изменяется пропорционально квадрату напряжения. При снижении приложенного к двигателю напряжения в два раза сила его пускового тока, равная $\frac{U_{пуск}}{Z_{\delta}}$, бу-

дет снижена также в два раза (фиг. 354). Таким образом, снижая силу пускового тока в случае реактора в k раз, мы снижаем вращающий момент двигателя в k^2 раз.

Иначе обстоит дело в случае пуска при помощи автотрансформатора. Понятно, что если автотрансформатор снизит напряжение двигателя в k раз, то момент двигателя уменьшится также в k^2 раз, как и при реакторе. Но цель применения реактора и автотрансформатора заключается в основном не в том, чтобы



Фиг. 354. Соотношение токов при двух различных методах пуска.

снижать силу тока в двигателе, а в том, чтобы снизить силу тока в сети. Если мы при автотрансформаторе снизим силу тока в сети в k раз, то вращающий момент двигателя снизится также в k раз, а не в k^2 раз, как при реакторе. Причина этого заключается в самом принципе автотрансформации.

В самом деле, в случае применения реактора через обмотки двигателя и через реактор проходит одна и та же сила тока — сила тока сети. В случае автотрансформатора мы в двигателе можем допустить большую силу тока, чем в сети, так как автотрансформатор большую силу тока двигателя соответственно преобразовывает в меньшую и соотношение токов в нем обратно пропорционально соотношению напряжений. Это положение иллюстрируется фиг. 354. Следовательно, при той же самой силе тока в сети (последняя задается мощностью подстанции) мы в случае реактора должны допустить большее снижение напряжения на зажимах двигателя, чем в случае автотрансформатора.

Можно сказать, что в случае реактора вращающий момент двигателя снижается пропорционально квадрату снижения пускового тока для сети. В случае автотрансформатора снижение момента происходит пропорционально первой степени тока.

Из всего изложенного ранее можно сделать следующий вывод. Для получения более экономичной установки желательно применять пуск синхронного двигателя от полного напряжения. Если подстанция или конструкция двигателя (последнее обстоятельство имеет значение для двигателей высоких скоростей) не допускает пуска от полного напряжения из-за высокой силы тока, то приходится прибегать к пуску от пониженного напряжения. Наиболее экономичным является пуск через реактор, и возможность его применения при пуске от пониженного напряжения нужно рассмотреть в первую очередь. Если при заданной пусковой силе тока в сети двигатель при пуске через реактор не дает нужных вращающих моментов (пускового и подсинхронного), то необходимо прибегнуть к пуску через автотрансформатор.

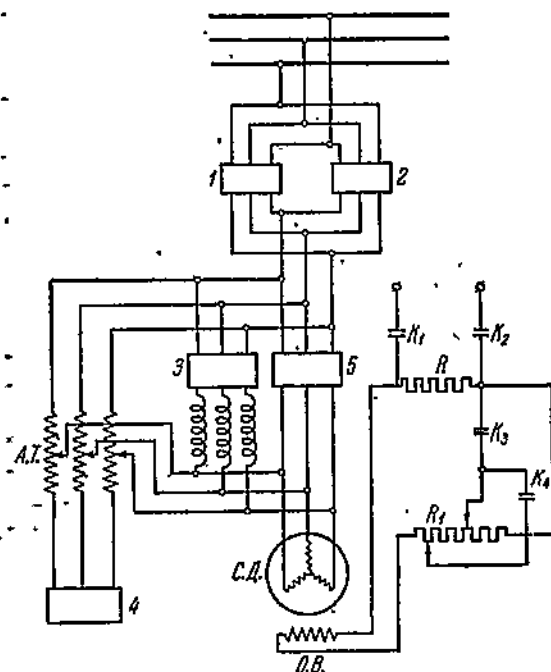
В случае наличия в установке большого числа синхронных двигателей и при возможности производить пуск их последовательно можно воспользоваться двумя автотрансформаторами для пуска всех двигателей, устраняя пусковые шины. Возможно также применить одно общее пусковое автоматическое устройство [Л. 243].

141. Схема Корндорфера

В целях получения плавного изменения момента синхронного двигателя, а также в целях уменьшения пусковых kVA в синхронных двигателях большой мощности иногда прибегают к двухступенчатому пуску. Двухступенчатый пуск синхронного двигателя имеет особо важное значение для мощных приводов с малым пусковым и большим синхронизирующим моментом. Первая ступень получается от зажимов автотрансформатора, дающих обычно 32—33% номинального напряжения. По достижении двигателем 50—75% номинальной скорости он переключается на другие зажимы автотрансформатора, дающие 60—70% номинального напряжения. После приближения к 95% синхронной скорости двигатель включается на полное напряжение.

В ряде установок применяется комбинированная схема пуска синхронного двигателя через автотрансформатор и через реактор. Автотрансформатор дает первую ступень пускового напряжения, реактор—вторую. Главное преимущество такой схемы заключается в том, что она дает возможность переходить с одной ступени на другую без перерыва тока, что имеет место как при схемах с реактором, так и при автотрансформаторе. Перерыв тока всегда вызывает некоторое снижение скорости двигателя, что несколько повышает толчок тока. В схемах без перерыва тока толчки тока уменьшаются. Это имеет более важное значение для мощных и в особенности для быстроходных двигателей. Такая комбинирован-

ная схема двухступенчатого пуска через автотрансформатор и реактор без перерыва тока известна под названием схемы Корндорфера.

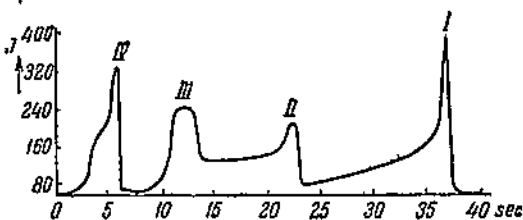


Фиг. 355. Схема Корндорфера.

ного. При этом обмотка возбуждения отключена от возбуждителя и замкнута на сопротивление R . Все контакторы k_1 , k_2 , k_3 и k_4 разомкнуты.

После достижения двигателем 50—75% номинальной скорости особое частотное реле замыкает масляник 3 и размыкает масляник 4, тем самым включая двигатель на сеть через реактор. Двигатель получает вторую ступень напряжения—обычно 70% номинального. После разгона двигателя до 95% синхронной скорости особое реле малой частоты включает в цепь возбуждения постоянный ток (замыкая контакторы k_1 , k_2 и k_3) благодаря чему двигатель впадает в синхронизм. Вслед за достижением синхронной

Принципиальная схема Корндорфера представлена на фиг. 355. Пуск по этой схеме производится следующим образом. Двигатель имеет один или два главных масляника (1 и 2) для прямого и обратного вращения двигателя (переключение фаз, если последнее необходимо по условиям работы привода) на разрывную мощность системы. Прежде всего замыкается нулевая точка автотрансформатора посредством масляника 4, после чего включается один из главных масляников (1 или 2). Двигатель получает при этом первую ступень пускового напряжения, обычно в 30% от номинального.



Фиг. 356. Кривая пускового тока двигателя в 3000 кВт, 83,7 об/мин.

скорости двигатель включается на номинальное напряжение замыканием масляника 5 и последующим размыканием масляника 3. Одновременно замыканием контактора k_2 изменяется ток возбуждения от величины, соответствующей второй ступени напряжения, до величины, равной номинальному току возбуждения. Характер изменения пускового тока двигателя мощностью в 3000 kW, 83,7 об/мин представлен на фиг. 356. Первый толчок тока (I) соответствует включению на 32% номинального напряжения, второй (II) — на 70%, третий (III) — включению слабого тока возбуждения, четвертый (IV) — переключению на номинальное напряжение. В схеме Корндорфера масляники 3, 4 и 5 выбираются по токам переключения. В американской практике они обычно устанавливаются в подстанциях и цехах непосредственно, без взрывных камер.

142. Пуск синхронного двигателя по методу Хиббарда, пуск через емкость и сопротивление, пуск с разомкнутой обмоткой возбуждения и приключенным возбудителем

Пуск синхронного двигателя от пониженного напряжения требует применения или автотрансформатора или реактора. Совершенно естественным было стремление получить снижение пусковых kVA без второй добавочной аппаратуры.

Необходимое снижение пусковых kVA должно быть достигнуто снижением пускового тока при минимальном уменьшении пускового и подсинхронного моментов, т. е. при небольшом снижении напряжения. Это может быть получено посредством особого включения статорных обмоток двигателя при пуске по методу Хиббарда. Метод может быть применен там, где статорная обмотка состоит из двух или более параллельных ветвей. При пуске двигателя в ход в сеть включается лишь по одной параллельной ветви каждой фазы.

Так как сопротивление одной ветви обмотки статора всегда будет больше, чем сопротивление нескольких ветвей, включенных параллельно, то при таком включении двигатель может пускаться в ход непосредственно от полного напряжения. Необходимость в добавочной самондукции или автотрансформаторе отпадает.

Вместо включения в сеть при пуске одной из параллельных ветвей двигателя можно включать все, соединяя их последовательно. Такая схема применяется при малых мощностях синхронных двигателей.

Преимущества этого метода перед схемой пуска через реактор заключаются в следующем. Напряжение в сети падает меньше, чем при реакторе или автотрансформаторе, так как cosφ пускового режима повышается; отпадает намагничивающий ток автотрансформатора и реактора. Коэффициент эффективности пуска получается выше, чем с реактором. Пусковой момент оказывается естественно меньше, чем при пуске с нормальным включением обмоток от полного напряжения, но выше, чем при том же пус-

ковом токе с реактором, так как роль индуктивности играют сами обмотки двигателя. Снижение напряжения на зажимах двигателя, а следовательно, и его магнитного потока происходит в меньшей мере, чем при внешней индуктивности, что и дает меньшее снижение вращающих моментов. Кривая момента двигателя во время пуска постепенно повышается, что делает ее весьма подходящей для механизмов с вентиляторным моментом.

Желание иметь более высокие пусковые моменты синхронных двигателей при сниженных kVA побудили использовать в пусковых схемах этих двигателей конденсаторы с сопротивлением. Снижение напряжения посредством последовательного включения с двигателем при пуске одного активного сопротивления не нашло применения из-за значительных потерь.

Некоторые нерегулируемые промышленные приводы требуют одновременно высокого пускового и синхронизируемого моментов. Для получения от синхронного двигателя стандартной современной конструкции при пуске больших моментов в двигателях низких скоростей иногда прибегают к повышению напряжения на их зажимах при пуске. При повышении напряжения на двигателе при пуске с помощью автотрансформатора до (150—175%) U_N момент двигателя возрастет в $1,5^2 = 2,25$ или $1,75^2 = 3,06$ раза.

При этом пусковые kVA двигателей низких скоростей оказываются не выше, чем пусковые kVA двигателей высокой скорости при пуске от номинального напряжения. Несмотря на повышение напряжения, а следовательно, и пускового тока двигателя, необходимость крепления катушек статора обычно не возникает. Подобная схема дает возможность получать высокий подсинхронный момент и нашла в американской практике применение для пульверизаторов. Этот пример хорошо иллюстрирует современные достижения в конструировании синхронных двигателей и рост мощности подстанций. В то время как раньше при пуске синхронного двигателя необходимо было всегда снижать напряжение, сейчас в отдельных случаях прибегают даже к повышению этого напряжения.

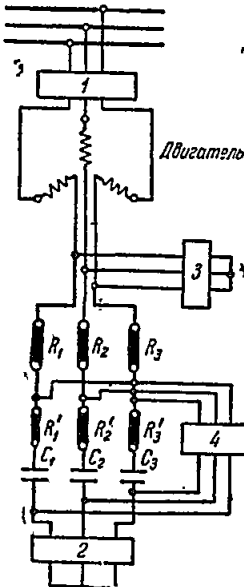
Иногда это повышение используется лишь в течение части периода пуска, главным образом при скорости, близкой к синхронной, для увеличения подсинхронного момента.

Вместо непосредственного повышения напряжения на зажимах двигателя для увеличения подсинхронного момента можно прибегнуть к косвенному, снижая реактивное сопротивление цепи двигателя при пуске. Это реактивное сопротивление, снижая магнитный поток двигателя, оказывает на момент большое влияние даже около синхронной скорости. Для уменьшения реактивности цепи двигателя около синхронной скорости в нее вводится конденсатор согласно схеме фиг. 357.

Конденсатор вводится последовательно с добавочным сопротивлением в нулевую точку двигателя.

Такая схема дает более дешевые масляные выключатели.

Пуск по схеме фиг. 357 производится следующим образом. В первый момент пуска замыкается масляник 4, шунтирующий часть сопротивления с емкостью, масляник 2, замыкающий нулевую точку двигателя, и масляник 1. Двигатель оказывается включенным на сеть через сопротивления R_1, R_2, R_3 . По достижении двигателем 70% синхронной скорости замыкается масляник 3. Двигатель оказывается включенным на номинальное напряжение. Для дальнейшего повышения напряжения на зажимах двигателя, т. е. для увеличения подсинхронного момента, при 80% синхронной скорости, уменьшается сопротивление в обмотке возбуждения и размыкаются масляники 3 и 4. Двигатель оказывается включенным на сеть через сопротивление и емкость, что, увеличивая напряжение на зажимах двигателя, вызывает необходимое повышение подсинхронного мо-



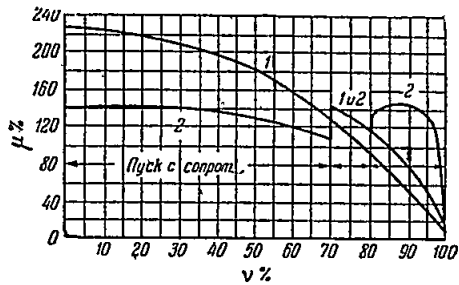
Фиг. 357. Схема для пуска синхронного двигателя через конденсатор и сопротивление.

дента. Последняя операция пуска заключается во включении постоянного тока и замыкании масляника 3.

Сравнение пусковых характеристик двигателя для пуска от полного напряжения и для пуска через конденсатор дано на фиг. 358.

Кривая 1 от $v = 0$ до $v\% = 100\%$ n_0 дает кривую M при пуске от номинального напряжения. Кривая 2 от 0 до 70% n_0 дает пуск через сопротивление. Кривые 1 и 2 от $v\% = 70\%$ до $v\% = 80\%$ показывают повышение при номинальном напряжении за счет влияния обмотки возбуждения. Кривая 2 от $v\% = 80\%$ до $v\% = 100\%$ дает повышение за счет влияния конденсатора.

Подобная схема пуска синхронного двигателя оказывается весьма удобной в тех случаях, когда нужен плавный пуск двигателя при достаточном подсинхронном моменте. Примером может служить пуск газового дезинтегратора.



Фиг. 358. Пусковые характеристики синхронного двигателя при пуске через конденсатор и сопротивление

Как известно, оставлять обмотку возбуждения синхронного двигателя разомкнутой во время пуска нормально нельзя вследствие большой индуктированной в ней э. д. с. и вследствие того, что двигатель приобретает при этом свойство одноосного включения. Однако замыкание обмотки возбуждения во время пуска на сопротивление также является нежелательным, ибо, повышая пусковой ток двигателя, она при заданных пусковых kVA дает снижение момента в начале пуска. Размыкание обмотки возбуждения во время пуска синхронного двигателя дает большое преимущество в том отношении, что пусковой ток двигателя при этом уменьшается на 15—30% для двигателей средней скорости и несколько меньше для двигателей низкой скорости. Момент двигателя при этом повышается на 5—15% вследствие уменьшения падения напряжения и уменьшения роли одноосного включения. В общем можно сказать, что размыкание обмотки возбуждения повышает коэффициент эффективности пуска на 30% для двигателей высокой скорости и на 15% для двигателя низкой скорости. Ранее (за исключением первых конструкций синхронных двигателей для асинхронного пуска) размыкание обмотки возбуждения при пуске никогда не применялось. В самые последние годы в американской практике в связи с исключительным ростом распространения синхронного двигателя стали прибегать и к пуску с разомкнутой обмоткой. Для осуществления пуска с разомкнутой обмоткой возбуждения последняя в таких случаях должна секционироваться по соображениям безопасности как для обмотки возбуждения, так и для обслуживающего персонала. Так как всякое секционирование требует дополнительных центробежных замыкателей или дополнительных колец, то иногда секционирование производится на неравные части. Число секций определяется величиной э. д. с., индуктированной в обмотке при пуске.

В двигателях высокой скорости большой мощности оставление обмотки возбуждения разомкнутой с ее секционированием оказывается вообще неприменимым.

Подобная схема в двигателях низкой скорости дает возможность повысить коэффициент эффективности пуска до 0,41. Так, при $M_{пуск} = 110\% M_N$ и $M_{подс} = 100\% M_N$ пусковые kVA составляют 270% kVA_N .

В отдельных случаях нашей практики, когда возбудитель насажен на вал синхронного двигателя, стали применять пуск при обмотке возбуждения, замкнутой на якорь возбудителя [Л. 242]. Подобная схема является привлекательной в том отношении, что в ней уменьшается количество потребной пусковой автоматической аппаратуры. Ток возбуждения автоматически повышается с ростом скорости.

Однако подобная схема имеет ряд существенных недостатков:

- 1) ухудшение пусковых характеристик двигателя из-за одноосного включения; 2) понижение надежности работы двигателя, так как при отключенном от сети статоре из-за каких-либо неприя-

ков в нем при вращении продолжает генерироваться э. д. с.; 3) якорь возбудителя может подвергаться действию высокого потенциала, что может быть небезопасным для обслуживающего персонала. Подобные схемы совершенно непригодны для высоковольтных двигателей, но могут быть использованы для низковольтных двигателей [Л. 244].

143. Выбор предельной допустимой в установке мощности короткозамкнутого и синхронного двигателей

Поскольку пусковой ток короткозамкнутого двигателя превышает номинальный ток в пять-семь раз (для обыкновенного беличьего колеса), включение такого двигателя в сеть может вызвать значительное падение напряжения. Это падение напряжения отзывается на работе других приемников, включенных в сеть. Очевидно, что мощность короткозамкнутых двигателей, приключаемых к сети как непосредственно без вспомогательных приспособлений, так и с ними, должна быть ограничена: 1) допустимым для других приемников падением напряжения в трансформаторе и фидере; 2) пределом допустимой перегрузки трансформатора.

Необходимо отметить, что задача непосредственного включения короткозамкнутого двигателя на сеть с точки зрения безопасной работы самого двигателя сводится по существу к созданию надежной механической конструкции обмотки статора. Эта конструкция должна быть такова, чтобы избежать существенных смещений и сдвигов изоляционного материала.

— Отсюда следует, что допустимая в установке мощность короткозамкнутого двигателя в основном зависит от трех факторов: 1) от допустимого падения напряжения; 2) от мощности питающего установку трансформатора; 3) от пускового толчка двигателя, т. е. от типа короткозамкнутого двигателя (обыкновенный, Бушера или с глубоким пазом).

Аналогичное влияние на сеть своими большими пусковыми токами оказывает и синхронный двигатель. Большая часть современных синхронных двигателей, за исключением очень быстроходных (750—3000 об/мин), с точки зрения надежности своей работы, также допускает пуск от полного напряжения.

Необходимость ограничения пускового тока часто довольно мощного синхронного двигателя по условиям значительного падения напряжения в питающей линии, сказывающегося на работе других приемников предприятий, заставляет прибегать во многих случаях к пуску этого типа двигателя от пониженного напряжения. Выбор предельной допустимой для непосредственного пуска мощности синхронного двигателя связан с теми же факторами, что и в случае короткозамкнутого двигателя.

При анализе этого вопроса необходимо исходить из схемы питания синхронного двигателя (высоковольтный или низковольтный) и всех других приемников предприятия.

Главнейшим фактором в выборе приемлемых для установки мощностей синхронного и короткозамкнутого двигателей является допустимое падение напряжения. Наиболее чувствительными в этом отношении являются осветительные приемники. Очевидно, что допустимая мощность короткозамкнутого двигателя при питании двигателей и светильников от общего трансформатора всегда будет ниже, чем при питании двигателей и светильников от отдельных трансформаторов. Из-за влияния падения напряжения в трансформаторах предприятия допустимая мощность высоковольтного синхронного двигателя будет выше низковольтного, питаемого через трансформатор. Отчасти по этим соображениям, отчасти по условиям экономичности и безопасности современная практика в ряде случаев применяет раздельное питание двигателей и светильников предприятий.

Практика последнего времени при совместном питании силовой и осветительной сетей от общего трансформатора допускает предельную мощность короткозамкнутых и синхронных двигателей при пуске от полного напряжения сети в 22—28% от мощности питающего трансформатора. В случае трансформаторов, питающих лишь силовую нагрузку, эта цифра повышается до 75—85% [Л. 247]. Подобные выводы исходят из шестикратного пускового тока двигателя. Точное значение допустимой мощности может быть установлено в каждом частном случае после детального подсчета.

144. Рациональный выбор нерегулируемого типа двигателя переменного тока при мощности примерно до 100 kW

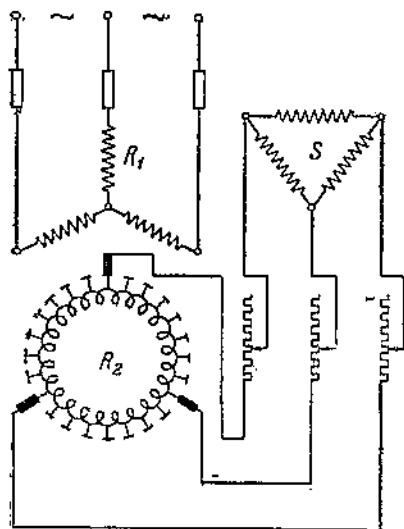
При мощностях нерегулируемых двигателей до 100 kW возможно применение следующих типов: короткозамкнутый асинхронный, асинхронный с кольцами, синхронный, компенсированный, синхронизированный с самовозбуждением.

Задача настоящего параграфа заключается в том, чтобы установить примерные пределы применимости всех перечисленных выше типов двигателей. Причины ограничения рассмотрения проблемы мощностью двигателей в 100 kW будут ясны из дальнейшего.

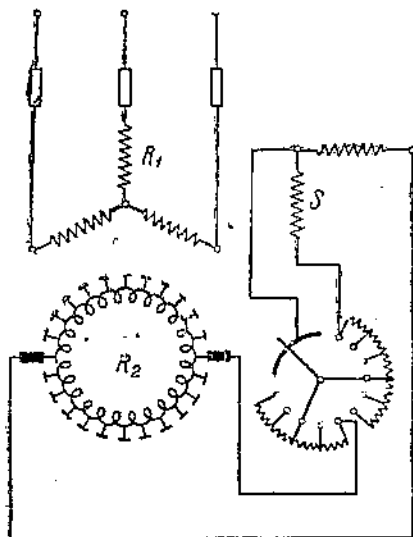
Из всех перечисленных типов двигателей самым дешевым по первоначальной стоимости и простейшим по эксплуатации и обслуживанию является короткозамкнутый двигатель. Двигатель с кольцами стоит дороже короткозамкнутого, имеет несколько худший cos φ, несколько меньший к. п. д. и занимает больше места. Процентная разница в первоначальной стоимости двигателя с кольцами и короткозамкнутого тем больше, чем меньше мощность двигателя. Отсюда совершенно ясно, что там, где это возможно по условиям пускового тока (условия, определяемые мощностью подстанции и родом приключенных к ней приемников) и по условиям пускового момента (условие, определяемое рабочей машиной), нужно стремиться к применению корот-

козамкнутого двигателя. Двигатель с кольцами как более дорогой, как имеющий более низкие энергетические показатели ($\cos \varphi$ и к. п. д.), как занимающий больше места и как более сложный для эксплуатации — следует устанавливать лишь там, где применение короткозамкнутого двигателя невозможно. Полная эксплуатационная стоимость двигателя с кольцами всегда выше таковой для короткозамкнутого двигателя.

Иначе обстоит дело с тремя другими типами двигателей: компенсированным, синхронизированным и синхронным. Все эти три типа двигателей по первоначальной стоимости стоят значительно дороже короткозамкнутого асинхронного, первые два — в



Фиг. 359. Схема компенсированного двигателя Осноса.

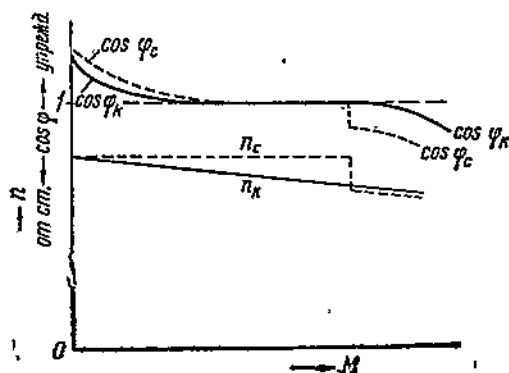


Фиг. 360. Схема синхронизированного двигателя.

силу усложненной конструкции, синхронный — вследствие более сложной конструкции и потребности в возбуждении. Для эксплуатационной стоимости получаем иные соотношения.

В современной практике стоимость электрической энергии устанавливается в зависимости от $\cos \varphi$. Следовательно, стоимость 1 kWh для синхронного, компенсированного и синхронизированного двигателей будет меньше, чем для короткозамкнутого. Таким образом более высокая первоначальная стоимость этих двигателей и более высокие расходы по обслуживанию их могут компенсироваться выигрышем в стоимости энергии. Решить вопрос о том, какой тип двигателя будет наиболее выгоден, можно только детальными экономическими подсчетами. Мы рассмотрим здесь этот вопрос в постулативной форме, не приводя (для экономии места) многочисленных технико-экономических подсчетов.

Сравним прежде всего двигатель синхронизированный с компенсированным. Из сопоставления схем и характеристик этих двигателей (фиг. 359 и 361) можно сказать, что эти два типа двигателей с точки зрения $\cos \varphi$, η и с точки зрения первоначальной стоимости равноценны. В самом деле, и тот и другой типы двигателя имеют коллектор с небольшой добавочной обмоткой на роторе. Разница в числе щеток на коллекторе (две на пару полюсов в синхронизированном и три—в компенсированном) не дает практически разницы в стоимости. Как это подтверждается сопоставлением прейскурантных цен германских фирм на эти дви-



Фиг. 361. Некоторые характеристики компенсированного (К) и синхронизированного (С) двигателей.

по своим характеристикам в целом (фиг. 361) синхронизированный двигатель хуже компенсированного. Вот почему Первая всесоюзная конференция по электроприводу в Харькове в 1930 г. постановила по предложению автора производство синхронизированных двигателей с самовозбуждением у нас в СССР не организовывать. Применение этого типа двигателей в капиталистической промышленности является хорошим примером, характеризующим неправильное решение технических задач в условиях капиталистической экономики.

Переходим к сравнению лучшего из двух рассматриваемых типов компенсированного двигателя с короткозамкнутым. На стороне первого высокий $\cos \varphi$, на стороне второго—низкая первоначальная стоимость, более высокий к. п. д. и более простое обслуживание. Стоимость компенсированного двигателя при массовом изготовлении примерно на 20—30% выше стоимости двигателя с кольцами за счет коллектора и добавочной обмотки.

Отсюда ясно, насколько большая разница получается в стоимости двигателя компенсированного и короткозамкнутого. Грубые подсчеты полной эксплуатационной стоимости с учетом влияния

гателя, по стоимости они равноценны. Естественно, что нет никаких оснований изготовлять и устанавливать на наших заводах как тот, так и другой типы указанных двигателей. Лучшим из этих двигателей оказывается двигатель компенсированный в силу низкой перегрузочной способности синхронизированного двигателя в синхронном режиме $\lambda_M \approx 1,5$ и в силу более резкого изменения в нем $\cos \varphi$ при колебаниях нагрузки. Несомненно, что

на стоимость энергии дают все-таки компенсированным двигателям некоторый небольшой перевес над короткозамкнутыми.

Однако этот фактор существенной роли не играет. Поэтому применение компенсированных двигателей на наших заводах нецелесообразно.

Для получения выводов о пределах применимости короткозамкнутого синхронного двигателя нужно произвести их подробное экономическое сравнение.

Такое сопоставление приводит к заключению, что наиболее экономичными типами двигателей являются: короткозамкнутый—примерно до 100 и синхронный—примерно свыше 100 kW. Подобный вывод вполне соответствует американской практике, где раздел между короткозамкнутым и синхронным двигателями уже давно лежит около 70—100 kW. Меньшие мощности синхронных двигателей оказываются неэкономичными из-за добавочной стоимости возбuditеля и более сложной пусковой автоматической аппаратуры.

Интересно отметить, что по статистике 1936 г. из установленных в США двигателей переменного тока мощностью до 100 kW 90% являлись короткозамкнутыми. К тому же времени в Англии из двигателей до 5 kW 95% были короткозамкнутыми, из двигателей до 100 kW—50%.

Из изложенного следует, что основными типами двигателей для нерегулируемых приводов нашей промышленности нужно считать двигатели короткозамкнутые, примерно до мощности в 100 kW, и двигатели синхронные при мощности свыше 100 kW. Интересно, что до 1930 г. (до начала периода капитальной реконструкции нашей промышленности) наиболее распространенным у нас был двигатель с кольцами, который теперь отступает на задний план.

Американская практика в отдельных случаях применяет синхронные двигатели, начиная от мощности в 10—15 kW. Установки с такими малыми мощностями синхронных двигателей выгодны лишь тогда, когда имеется возможность отказаться от отдельных возбuditелей, т. е. когда на предприятии имеется постоянный ток или когда устанавливаются несколько синхронных двигателей. Очевидно, что при нескольких двигателях вместо отдельного возбuditеля возможно прибегнуть к общему возбuditельному агрегату. При этом первоначальная стоимость оборудования снижается по сравнению с установкой двигателей с отдельными возбuditелями. Подобные установки с синхронным двигателем средних мощностей выполнены фирмой GEC в 1929 г. для наших холодильников в Орше, Казани, Краснодаре, Мелитополе и Виннице.

145. Рациональный выбор нерегулируемого типа двигателя переменного тока при мощности свыше 100 kW

Данный вопрос нами будет здесь разбираться в той же плоскости, как и в предыдущем параграфе, и по тем же самым причинам. В заголовке параграфа поставлено численное значение мощности в 100 kW, так как на основании предыдущего рассмотрения

мощность в 100 kW в современной практике можно считать ориентировочным разделом между областями применения короткозамкнутого и синхронного двигателей для крупных промышленных предприятий.

При мощностях двигателей свыше 100 kW вообще возможно применение следующих типов: 1) синхронного; 2) асинхронного с кольцами с компенсатором фаз; 3) асинхронного с кольцами; 4) короткозамкнутого; 5) компенсированного; 6) синхронизированного с отдельным возбудителем.

По сравнению с предыдущим параграфом здесь отпал синхронизированный двигатель с самовозбуждением, не изготовляющийся на мощность свыше 40 kW и добавились: асинхронный с компенсатором фаз и синхронизированный с отдельным возбудителем. Последние два типа имеют между собой то сходство, что требуют для себя отдельного возбудителя, причем в отличие от синхронного двигателя объединение нескольких возбудителей в одну возбудительную группу здесь невозможно. Поэтому-то о применении этих двух типов двигателей может идти речь лишь при мощностях свыше 100 kW.

Для того чтобы подойти к окончательным выводам, мы сначала исключим из перечисленного выше списка те типы двигателей, которые по своим технико-экономическим свойствам хуже других. Прежде всего мы должны отказаться от использования синхронизированного двигателя с отдельным возбудителем. Применение его в нашей промышленности мы считаем нецелесообразным по тем же мотивам, что и синхронизированного двигателя с самовозбуждением. Синхронизированный двигатель с отдельным возбудителем по стоимости можно считать примерно равноценным с синхронным двигателем и с асинхронным двигателем с компенсатором фаз. Все эти три типа двигателей имеют возбудители, хотя и отличных конструкций. Синхронизированный двигатель имеет худшие технические характеристики как в отношении формы кривой $\cos\phi$, так и в отношении перегрузочной способности. Коэффициент полезного действия синхронизированного двигателя ниже к. п. д. асинхронного с компенсатором фаз, а к. п. д. последнего ниже к. п. д. синхронного двигателя. Если иностранные (европейские) фирмы устанавливают синхронизированный двигатель до сих пор, то в силу чисто исторических причин. Европейские фирмы конструируют этот двигатель типа Данильсона уже с 1901 г. Они своевременно не обратили внимания на необходимость развития синхронного типа двигателя, отстали в этом отношении несколько от США и теперь никак не хотят отказаться от синхронизированного двигателя. Производство этого типа двигателей в свое время было налажено у нас на ХЭМЗ, но постановлением конференции по электродвижению в 1930 г., по докладу автора, производство было прекращено.

Точно также мы не считаем целесообразным применение и изготовление у нас компенсированных машин с мощностью свы-

ше 100 kW. Компенсированный двигатель в этих мощностях не имеет по существу никаких особых преимуществ перед асинхронным двигателем с компенсатором фаз.

Основным типом регулируемого двигателя для мощностей свыше 100 kW мы должны считать двигатель синхронный. Из изложенного в предыдущем параграфе ясно, что синхронный двигатель при этих мощностях является более экономичным, чем асинхронный с кольцами, и более экономичным, чем короткозамкнутый.

Как указано выше, асинхронный двигатель с кольцами в рассматриваемых пределах является менее экономичным, чем синхронный, в особенности, если учесть, что при больших мощностях и для двигателя с кольцами становится обязательным автоматическое управление. Однако в отдельных случаях мы вынуждены все-таки прибегать к двигателю с кольцами, а именно там, где нельзя поставить синхронный. Это имеет место в установках, не допускающих пусковых толчков тока синхронного двигателя, в приводах с резко пиковыми перегрузками, работающими без маховика, и в приводах с маховиком. В качестве наиболее типичного примера можно указать группу Леонарда-Ильгнера, служащую для приводов реверсивных станов и привода черновых клетей листовых станов. Понятно, можно и здесь пойти на применение синхронного двигателя, выбрав только его мощность уже не по нагреву, а по перегрузочной мощности. Однако подобная установка с синхронными двигателями до сих пор по капитальным затратам оказывалась значительно дороже, чем установка асинхронного двигателя с маховиком. Тем не менее практика последнего времени идет по пути дальнейшей замены асинхронных двигателей с маховиками двигателями синхронными.

Наиболее мощные синхронные двигатели, обслуживающие непосредственно исполнительные механизмы, имеют мощность 9 300 kW, 6 900 V, 450 об/мин и установлены для привода насосов в бассейне реки Колорадо. Пуск двигателей производится от полного напряжения.

В заключение необходимо отметить следующее. Подобно тому как иногда оказывается целесообразным применение синхронных двигателей при мощностях порядка 10—20 kW, точно так же иногда становится выгодным применение короткозамкнутых двигателей при очень больших мощностях. Так, их часто применяют в Европе для привода мощных быстроходных центробежных насосов компрессоров турбовоздуходувок. В подобных установках синхронный двигатель на 1 500—3 000 об/мин иногда не может конкурировать с короткозамкнутым. Двигатели с кольцами в таких установках оказываются обычно нежелательными из-за больших сил токов на кольцах. Подобные мощные короткозамкнутые двигатели установлены, например, на некоторых ленинградских заводах.

За границей существуют, например, электроприводы с короткозамкнутыми двигателями с непосредственным пуском типов мощ-

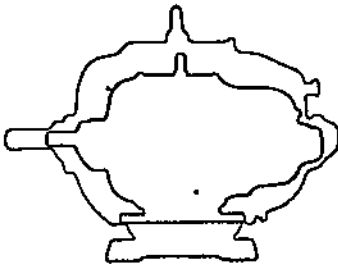
ностей: 1) 3900 kW, 6000 V, 50 Hz, 2970 об/мин на турбовоздуходувке; 2) 4100 kW, 10000 V, 50 Hz, 1440 об/мин. То же на турбовоздуходувке; 3) 4000 kW, 6000 V, 125 об/мин на поршневом компрессоре. Фирмой Саксенверк поставлен для привода двух синхронных генераторов короткозамкнутый двигатель мощностью 6000 kW, 6000V, 1496 об/мин. Пуск этого двигателя производится посредством вспомогательного асинхронного двигателя с кольцами, статор которого при пуске включается последовательно с обмотками главного двигателя в его нулевую точку. Время пуска 2,75 мин, наибольший толчок тока $0,37 I_N$.

ГЛАВА XI

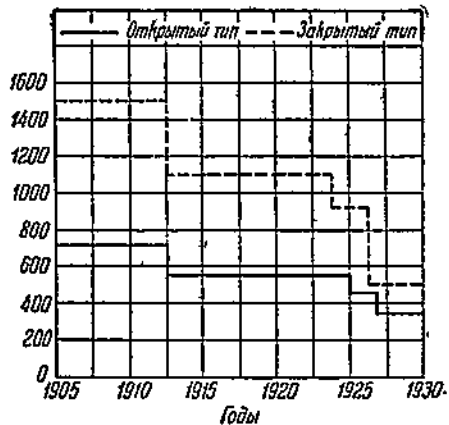
ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОГО ТИПА ДВИГАТЕЛЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЕГО ОТ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ НЕГО

146. Общие замечания

Современное направление развития электрических машин характеризуется прежде всего максимальным использованием активных и конструктивных материалов, т. е. снижения активного и полного веса на единицу мощности машины. В качестве примера на фиг. 362 приведены для сравнения габариты (наружный контур) асинхронного двигателя мощностью 20,5 kW, типа Д, выпускавшегося ХЭМЗ до 1925 г., и габариты (внутренний контур) двигателя той же мощности типа Т, выпуск которого был начат тем же заводом в 1927 г. Фиг. 363 показывает изменение по годам



Фиг. 362. Сравнение габаритов асинхронного двигателя в 20,5 kW старого и нового типа.



Фиг. 363. Изменение веса по годам трехфазных асинхронных двигателей мощностью 22 kW, 1 000 об/мин.

веса трехфазного асинхронного двигателя мощностью 22 kW, 1 000 об/мин. Совершенствование в использовании активных и неактивных материалов при интенсификации отвода тепла является главным направлением развития современных двигателей.

Вторым существенным направлением следует считать создание большого числа разнородных конструктивных типов двигате-

лей, специально приспособленных для разных отраслей промышленности и разных исполнительных механизмов, в том числе и двигателей, сливающихся с рабочей машиной в единое неделимое целое. В результате чрезвычайно широкого применения электропривода возникло исключительное конструктивное разнообразие промышленных двигателей. Это разнообразие конструкции еще более расширяется, если мы станем говорить о двигателях, применяемых в быту, для медицинских целей, в военной технике и т. д. Полная классификация всех существующих у нас и за границей двигателей по конструкции представляет теперь уже весьма трудную, если не невозможную задачу. Достаточно сказать, что совсем недавно открытые асинхронные двигатели ХЭМЗ отличались от таких же двигателей завода „Электросила“ им. С. М. Кирова, Ярославского завода и т. д. В связи с этим Главэнергопромом еще в 1934 г. было отдано распоряжение о разработке единых для всего СССР серий электрических машин. Основные материалы по этому вопросу опубликованы в сборниках Главэнергопрома.

Созданием единых серий в основном закончена одна стоящая перед нашими электромашиностроительными заводами задача: обеспечение народного хозяйства наиболее дешевыми, наиболее удобными и наиболее надежными двигателями таких типов (открытых и закрытых), которые были бы пригодны для разных отраслей промышленности.

Однако остается вторая не менее важная для народного хозяйства задача—создание специальных типов двигателей, подходящих для отдельных отраслей промышленности, для отдельных исполнительных механизмов.

Здесь на сцену выступает необходимость создания встроенных двигателей, двигателей на высокие скорости, тихоходных двигателей, специальных систем для регулирования скорости.

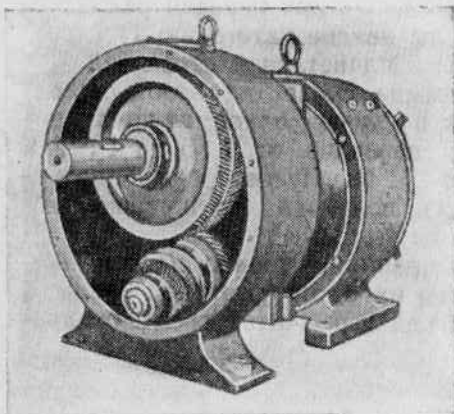
Особое значение имеет конструирование на наших заводах так называемых редукторных двигателей, т. е. двигателей, объединенных с редуктором. Необходимость их конструирования проистекает из следующих соображений.

Наиболее простым способом привода с точки зрения механической принципиально должно быть непосредственное соединение двигателя с исполнительным механизмом. Слияние двигателя с исполнительным механизмом в единое неделимое целое оказывается осуществимым в исключительно редких случаях.

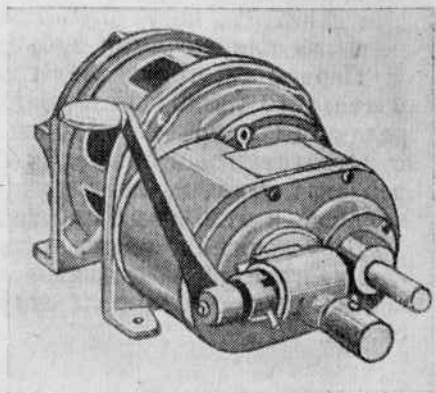
Рабочие орудия довольно часто вращаются с такой малой скоростью, на которую двигатели по условиям их работы как технически, так и экономически изготовлены быть не могут. Снижение номинальной скорости в двигателе влечет за собой сильное увеличение габаритов машин и весьма большое увеличение стоимости. Всякие лишние передачи от двигателя к рабочей машине вносят добавочные потери, т. е. увеличивают расход энергии на установку и вызывают добавочные затраты. В свою оче-

редь двигатели тихоходные и быстроходные обладают разными к. п. д. Таким образом при рассмотрении вопроса о выборе типа передачи от двигателя к исполнительному механизму переплетается ряд различных факторов.

Каждый тип электрического двигателя (асинхронный, постоянного тока, синхронный и т. д.) при заданной мощности имеет некоторые наименьшие экономические числа оборотов в минуту, переходить за которые экономически или технически нецелесообразно. В ряде случаев выгоднее взять двигатель на высокое число оборотов в минуту с зубчатой передачей, чем двигатель на низкое число оборотов без этой передачи. Чем меньше



Фиг. 364. Защищенный редукторный двигатель постоянного тока, 62 kW, 440V, 1260/115 об/мин с двухступенчатой передачей.



Фиг. 365. Редукторный двигатель американской конструкции.

мощность двигателя, тем выше вообще минимальные экономические числа оборотов в минуту. Особенно это чувствуется в асинхронных двигателях, где снижение номинальной скорости ведет к снижению номинального $\cos \varphi$.

Открытый трехфазный короткозамкнутый двигатель мощностью 11 kW, 220 V, 50 Hz на 500 об/мин стоит почти в три раза больше, чем на 1500 об/мин. Значительное ухудшение имеется в $\cos \varphi$. В связи с этим нормальные асинхронные двигатели мощностью до 5,5 kW практически почти не изготавливаются на скорости ниже 750 об/мин, а двигатели с мощностью от 5,5 kW до 100 kW — на скорости ниже 500 об/мин.

Современная практика все шире и шире идет на применение быстроходных двигателей с соединением и с рабочей машиной через зубчатую передачу вместо тихоходных двигателей.

В связи с этим за последние годы почти все иностранные фирмы стали выпускать двигатели небольших мощностей с зубча-

тими передачами в одном корпусе—как наиболее выгодное решение. Такая конструкция может быть названа редукторным двигателем. Иногда подобные двигатели конструируются с коробкой скоростей.

На фиг. 364 показан защищенный редукторный двигатель со снятой крышкой. Фиг. 365 показывает редукторный двигатель американской фирмы Вестингауз. При односкоростном асинхронном двигателе редукторный двигатель фиг. 365 дает четыре скорости с пределами от 1550 до 69 об/мин.

Американские заводы изготовляют стандартные многофазные редукторные двигатели для мощностей от 0,5 кВт до 50 кВт и стандартные редукторные двигатели постоянного тока от 0,5 кВт до 5 кВт. В отношении применяемых зубчатых передач редукторные двигатели могут быть разделены на две категории: 1) с шевронными или елочными зубьями; 2) с планетарной передачей.

Первая категория дает соотношение скоростей валов исполнительного механизма и двигателя в случае одной ступени передачи 1:5, при двухступенчатой передаче от 1:5 до 1:18 и при трехступенчатой от 1:18 до 1:45. Планетарная одноступенчатая передача дает возможность получать соотношение,ходящее в отдельных случаях до 1:71.

В настоящей главе мы коснемся преимущественно классификации двигателей по способам защиты их от окружающей среды, а иногда, наоборот, защиты окружающей взрывчатой среды от двигателя.

147. Классификация способов защиты промышленных двигателей от окружающей среды по нормам СССР и иностранным

В зависимости от условий, в которых работает электродвигатель в промышленном предприятии, часто его приходится защищать от окружающей среды—от пыли, грязи, дыма, газов, сырости, кислотных паров, взрывчатой смеси, высокой температуры и т. д. Совершенно открытые стандартные двигатели могут устанавливаться лишь в сухих, чистых, непыльных помещениях, свободных от каких-либо примесей к воздуху, и там, где исключена возможность попадания в двигатель каких-либо посторонних предметов. Во всех остальных случаях двигатель должен защищаться от окружающей среды во избежание порчи изоляции, уменьшения срока службы и возможных механических повреждений двигателя.

Система защиты двигателя от окружающей среды или защита среды от возможных искрообразований в двигателе неизбежно переплетается с вопросами охлаждения двигателей, так как почти все способы защиты в той или иной мере ухудшают свободный обмен воздуха между окружающей средой и машиной.

Нормы СССР дают следующую классификацию машин по способам защиты машины от окружающей среды.

Открытые машины

Открытой машиной называется такая машина, в которой все вращающиеся и токопроводящие части не имеют специальных защитных приспособлений.

Защищенные машины

1. Защищенной машиной называется такая машина, у которой обмотки и другие части, находящиеся под напряжением или в движении, защищены от случайного прикосновения или проникновения внутрь машины посторонних тел, но таким образом, что свободный обмен воздуха между машиной и окружающей средой не нарушен. Против пыли, влажности и газов, содержащихся в воздухе, этот род машин является незащищенным.

2. Защищенной от падения капель сверху (капеза) машиной называется такая, которая кроме защиты согласно п. 1 имеет приспособление, исключающее возможность попадания в машину жидкости и грязи сверху.

3. Защищенной от дождя и брызг называется такая машина, которая кроме защиты согласно п. 1 имеет приспособления, предохраняющие от проникновения внутрь машины водяных капель и струй любого направления.

Закрытые машины

1. Закрытой машиной называется такая, которая, не будучи абсолютно герметической, не имеет никаких других отверстий кроме отверстий для болтов, скрепляющих отдельные механические части, и для вывода проводов или же имеет только отверстия, которые защищены крышками, препятствующими проникновению воздуха из машин в окружающее пространство и обратно.

2. Закрытой вентилируемой машиной называется закрытая машина с независимым охлаждением. Охлаждающая среда подводится посредством труб или других аналогичных приспособлений.

Примечание. Если закрытые машины должны иметь некоторые части под напряжением вне защитного кожуха, об этом должно быть специально оговорено. Пример: закрытый асинхронный двигатель с внешними контактными кольцами.

3. Герметически закрытой машиной называется машина, имеющая плотно закрытый корпус, не допускающий проникновения влаги внутрь машины при полном погружении ее в воду в течение 4 час.

Машины с защитой против взрыва

1. Машиной с защитой против взрыва называется машина, снабженная специальным кожухом, который может противостать без повреждения взрывам газа внутри машины и не передает пламени воспламеняющемуся газу вне ее и наоборот.

2. Машиной с защитной противовзрывной оболочкой для колец называется такая машина, в которой кольца и щетки заключены в специальную оболочку, могущую противостоять взрыву газов внутри нее и препятствующую выбиванию пламени вне ее.

Из приведенной классификации видно, насколько тесно переплетаются вопросы защиты машин от окружающей среды с вопросами вентиляции и охлаждения машин.

Нормы СССР дают в свою очередь следующее подразделение машин по системам охлаждения.

1. Машиной с естественным охлаждением называется такая машина, которая не имеет никаких специальных приспособлений для охлаждения.

2. Машиной с самовентиляцией называется такая машина, охлаждение которой достигается или вентилятором или каким-нибудь специальным приспособлением, составляющим с вращающейся частью машины одно целое.

Примечание. В том случае, когда воздух должен подводиться или отводиться посредством труб, в технических условиях машины должно быть сделано специальное указание.

3. Машиной с посторонним охлаждением называется такая машина, к которой охлаждающая среда (газообразная или жидкая) подается специальным приспособлением (вентилятором или насосом), работающим независимо от машины. Этот класс машин делится на три категории: 1) машины с воздушным охлаждением; 2) машины с замкнутой циркуляцией газа; 3) машины с водяным охлаждением.

Примечание. Если водяное охлаждение применено в машине только для подшипников, то такая машина к 3-й категории не относится.

Тесная связь вопросов защиты с вопросами охлаждения повела к тому, что в германских нормах (VDI) классификация закрытых машин непосредственно предусматривает условия охлаждения. Эти нормы различают: 1) закрытые машины с подведенными трубами; 2) закрытые машины с внутренней циркуляцией воздуха за счет собственного вентилятора (Mantelkühlung); 3) закрытые машины с водяным охлаждением; 4) герметически закрытые машины (gekapselte); 5) машины с защитой против взрыва (Schlag-wetterschutzte).

148. Общие основы выбора способа защиты двигателей от окружающей среды в разных отраслях промышленности

Поскольку открытая незащищенная машина всегда дешевле закрытой или защищенной как из-за лучших условий теплоотдачи, так и из-за отсутствия добавочных защищающих частей, необходимо там, где это допускают условия окружающей среды,

применять открытые машины. Однако в ряде случаев это оказывается невозможным. Там, где работа открытой машины влечет за собой уменьшение срока ее службы (главным образом за счет ухудшения условий работы изоляции), машина должна быть обязательно защищена или совершенно закрыта. В тех случаях, где имеется простая опасность попадания в двигатель тех или иных предметов, его приходится защищать дополнительными приспособлениями. В случае возможности попадания крупных предметов к двигателю в боковом щите добавляется четвертая спица. В случае возможности попадания в машину мелких предметов в щите устраиваются овальные отверстия, которые затягиваются металлической сеткой. Последняя может служить одновременно для защиты токопроводящих частей от прикосновения. Сетка совершенно не нарушает теплообмена воздуха между двигателем и окружающим пространством, однако применять ее без нужды все-таки не следует, так как обслуживание двигателя затрудняется. Подобные двигатели с сетками устанавливаются, например, в цехах холодной прокатки черных металлов, где самый процесс холодной прокатки требует полной чистоты помещений во избежание внедрения грязи в поверхность металла.

Указанные типы конструктивной защиты дают небольшое повышение стоимости двигателя. Вес двигателя при этом повышается на 3—10—15%, причем меньшие цифры относятся к двигателям меньшей мощности. Стоимость двигателя увеличивается соответственно на 5—15%.

Для защиты двигателя от каплюющей воды сверху (капежа) достаточно ограничиться применением жалюзи в овальных щитах двигателя. В случае же возможности попадания на двигатель брызг и дождя в любом направлении приходится прибегать к более серьезной конструктивной защите двигателя. Весьма часто двигателям приходится работать в чистых, но влажных помещениях. Двигатель в этом случае должен быть защищен от проникновения в изоляцию влаги. Это может быть достигнуто частично так называемой „противосыровой“ изоляцией. Выполнение последней осуществляется обычно усиленной дополнительной пропиткой в лаке, пропитыванием в масле и, наконец, при очень сильной влажности—асфальтированием.

Применение такой специальной изоляции является как будто наиболее дешевым способом защиты двигателя от влаги. Подобная специальная изоляция повышает стоимость двигателя примерно на 5—15%.

Большие трудности представляет внешнее конструктивное оформление типа двигателя для химической среды, т. е. в помещениях с кислотными парами и едкими газами. Так, есть производства, в которых единственной изоляцией проводов и кабелей может быть лишь резина.

Вместе с тем опыт работы электрооборудования на некоторых химических заводах показал, что при правильном уходе за элек-

трооборудованием открытые двигатели иногда работают достаточно надежно и в атмосфере едкой окружающей среды. Надежность работы электродвигателя повышается естественно от покрытия обмотки специальными кислотоупорными лаками.

Необходимо отметить, что в ряде химических производств с едкой окружающей средой успешно работают двигатели открытого типа с противосростной изоляцией. Поэтому, прежде чем на химических заводах с едкой, но не взрывоопасной средой идти на закрытые двигатели, нужно тщательно проанализировать выбор конструктивного типа двигателя в каждом частном случае.

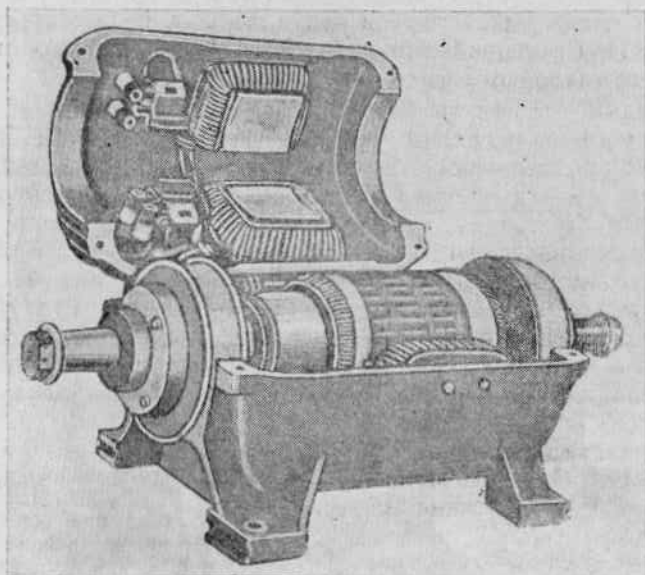
Значительно большие возможности имеются для защиты машины от высоких температур (например, от температур различных нагревательных печей или проходящих горячих слитков). Для этой цели в некоторых двигателях с успехом используется асбестовая изоляция. Температура изоляции в таких двигателях доходит до 200—250°.

Специфические условия защиты окружающей среды от двигателей требуются взрывчатой или горючей средой (газовые шахты, некоторые химические заводы, заводы синтетического каучука, нефтяные промыслы и т. п.). Здесь задача может быть решена лишь полным закрытием машины в противовзрывную оболочку с усиленными уплотнениями фланцев.

Из изложенного очевидно, что там, где это только возможно, следует применять открытые двигатели, имеющие преимущество как по стоимости, так и по условиям эксплуатации. Если же окружающая среда делает применение открытых двигателей недопустимым, то необходимо прибегать к той или иной защите двигателей. Полную защиту двигателя от окружающей среды дает лишь его полное герметическое закрытие. Однако условия охлаждения в таком двигателе чрезвычайно ухудшены, что вообще вызывает сильное удорожание закрытых двигателей.

Один из типичнейших примеров закрытого двигателя — американский металлургический двигатель — представлен на фиг. 366. Этот двигатель обладает шариковыми или роликовыми подшипниками, разъемным корпусом и огнеупорной изоляцией. Стоимость такого двигателя в 1,5—2 раза выше нормального. Замена якоря такого двигателя в эксплуатации по американским данным составляет всего 5—10 мин. Это обстоятельство исключительно существенно с точки зрения влияния на производительность металлургического завода.

Длительная мощность совершенно закрытых двигателей без вентиляции составляет всего лишь 35—60% от мощности открытых двигателей. Это обстоятельство ставит существенные ограничения мощности совершенно закрытых двигателей. Последние вообще не изготовлялись на мощность свыше 150 kW. Причины этого кроются в том, что мощность электрической машины растет пропорционально кубу геометрических размеров, а поверхность охлаждения — пропорционально второй степени. В тех слу-



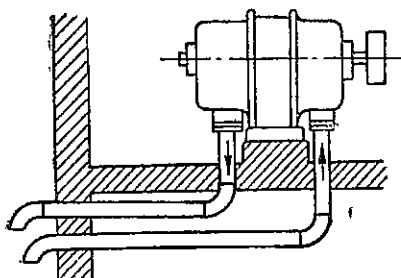
Фиг. 366. Металлургический тип двигателя постоянного тока.

чаях, когда работа производственных механизмов большой мощности (порядка нескольких сот и тысяч киловатт) связана с пылью, газом, высокой температурой или сыростью, или же вообще происходит в нечистых помещениях, двигатели для таких механизмов выносятся в отдельные двигательные (машинные) помещения или будки.

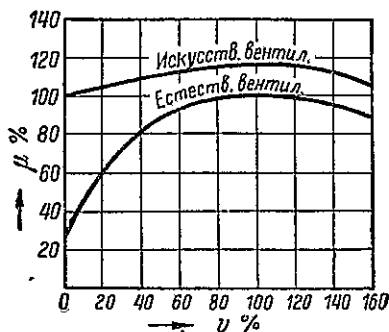
Независимое охлаждение оказывается обязательным для двигателей, работающих при низких числах оборотов в минуту. Сюда относятся, например, реверсивные прокатные двигатели постоянного тока мощностью в 5 000—10 000 kW на 40—50 об/мин. Сконструировать такие двигатели с числом пусков до 20 в минуту и перегрузочной способностью $\lambda_m = 3,7—4$ без искусственной вентиляции невозможно. Самовентиляция при такой малой скорости, как 40—50 об/мин, оказывается мало эффективной. Поэтому подобные двигатели всегда строятся с независимым охлаждением, однако они устраиваются не закрытыми, а открытыми с подводом воздуха снизу. Для содержания таких машин в чистоте они выносятся в отдельные машинные помещения.

Исключительно широкое распространение электрического привода в среде, опасной для изоляции или для токоведущих частей, повело к созданию закрытых вентилируемых двигателей. Эти двигатели (фиг. 367) охлаждаются чистым воздухом, забираемым вне помещения, в котором установлен двигатель. Подогретый воздух должен также выбрасываться наружу помещения. Если длина трубопроводов не превышает 10—20 м, то вен-

тиляция может осуществляться вентилятором, насаженным на вал двигателя. При большей длине трубопроводов необходим специальный вентилятор с отдельным двигателем.

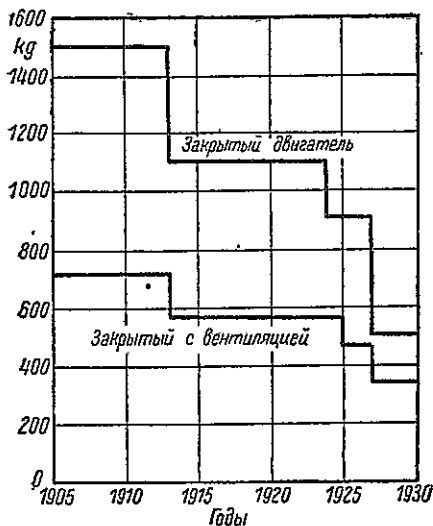


Фиг. 367. Закрытый вентилируемый двигатель с подводкой воздуха посредством труб.



Фиг. 368. Соотношение длительных моментов некоторого двигателя постоянного тока при естественной и искусственной вентиляции при регулировании скорости.

При применении двигателей с собственной вентиляцией необходимо иметь в виду, что в зависимости от устройства вентиляторов в ряде случаев мощность двигателя зависит от направления его вращения. При обратном направлении вращения по сравнению с необходимым мощность двигателя (вследствие ухудшения условий вентиляции) снижается иногда на 10—15%. Мощность таких вентилируемых двигателей почти не отличается от мощности таких же двигателей при открытом выполнении. Обычно она составляет от 80 до 100% мощности машин открытого выполнения и только при большой длине воздухопроводов снижается до 70—90%.

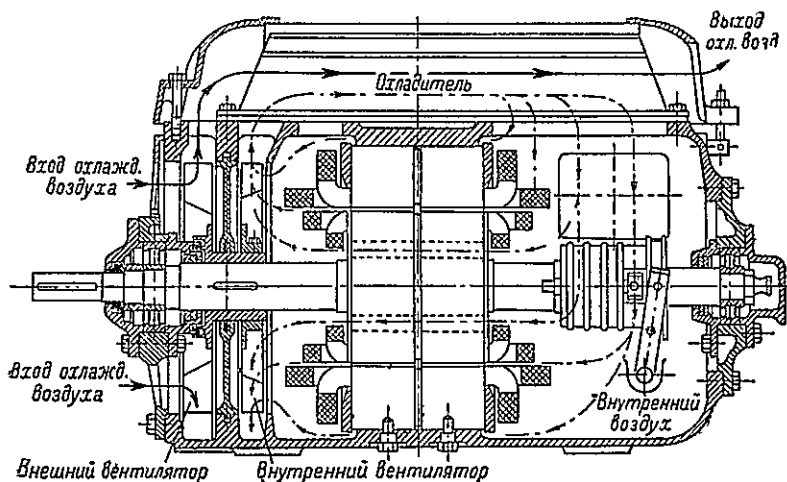


Фиг. 369. Соотношение весов закрытых и закрытых с вентиляцией асинхронных двигателей мощностью 22 kW, 1 000 об/мин по годам.

Фиг. 368 показывает соотношение длительных моментов двигателей с собственной (естественной) и искусственной вентиляцией при широкой регулировке скорости.

Фиг. 369 показывает соотношение весов по годам закрытого двигателя и закрытого с вентиляцией мощностью 22 kW, 1 000 об/мин фирмы SSW. Из него

Фиг. 369 показывает соотношение весов по годам закрытого двигателя и закрытого с вентиляцией мощностью 22 kW, 1 000 об/мин фирмы SSW. Из него



Фиг. 370. Схемы циркуляции внутреннего и внешнего воздуха в закрытом вентилируемом двигателе.

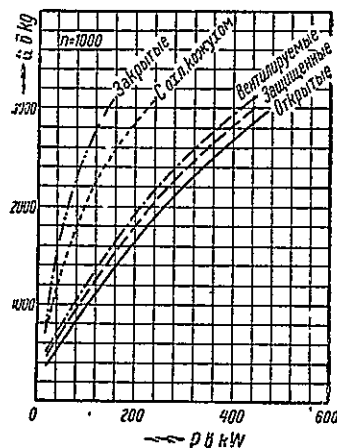
видно, как снизился вес при переходе от закрытых двигателей к закрытым с вентиляцией.

Применение к закрытым двигателям добавочного вентилятора с вспомогательным двигателем удорожает оборудование и обуславливает существование кроме электрической еще и воздухопроводной сети.

Поэтому заграничные фирмы и наши заводы создали двигатель переменного тока без постороннего охлаждения, но с охлаждающей рубашкой и двумя вентиляторами: одним наружным для охлаждения кожуха и внутренним для циркуляции воздуха внутри машины.

На фиг. 370 показана схема замкнутой вентиляции закрытого асинхронного двигателя с кольцами. Охлаждение в нем производится двумя вентиляторами, из которых один расположен внутри машины, а другой—вне закрытого кожуха двигателя. Этот последний вентилятор обдувает корпус двигателя. Оба вентилятора вращаются самим двигателем. Подобные двигатели применяют в химической, текстильной промышленности, в сельском хозяйстве, цементных фабриках, в котельных электрических станций, при установке на воздухе.

На фиг. 371 показано соотношение весов различных типов трехфазных асин-



Фиг. 371. Соотношение весов различных типов трехфазных асинхронных двигателей на 1000 об/мин при напряжении 500 В.

хронных двигателей на 1000 об/мин при напряжении в 500 V. Она показывает, что к закрытому двигателю с охлаждаемым кожухом без крайней необходимости прибегать не следует. Точно так же не следует применять без нужды и вентилируемые и защищенные двигатели, поскольку условия их осмотра и ремонта значительно хуже, чем у открытых двигателей.

149. Защита двигателей во взрывоопасной среде

В ряде отраслей промышленности приходится серьезно думать о защите окружающей среды от двигателя. Сюда относятся предприятия со взрывчатой атмосферой—газовые шахты, заводы взрывчатых веществ, нефтяные промыслы, производство синтетического каучука, некоторые химические предприятия и т. д.

Прежде чем говорить о взрывобезопасных двигателях, необходимо кратко коснуться вопроса о том, какие помещения следует относить к опасным по взрыву. Газовзрывобезопасное (герметическое) исполнение двигателей и аппаратуры вызывает их сильное удорожание, так как кожухи приходится рассчитывать на высокие давления. Поэтому отнесение того или другого цеха в категорию взрывоопасных требует основательного предварительного изучения вопроса. В правилах безопасности ВЭС отсутствуют указания о требованиях, касающихся электрооборудования взрывоопасных цехов в разных случаях.

Американский национальный кодекс электротехнических правил—Правила государственного страхования от огня (изд. 1933 г. раздел 32, стр. 212—227) делит все огнеопасные помещения на 4 класса:

- I класс: помещения, содержащие взрывчатые газы или пары;
- II класс: помещения, содержащие во взвешенном состоянии горючую пыль в таком количестве, что она образует с воздухом взрывчатую смесь;
- III класс: помещения, содержащие горючие волокна во взвешенном в воздухе состоянии;
- IV класс: помещения, где только хранятся, но не обрабатываются волокнистые вещества.

Германские правила (ETZ, 1934 г., № 1) различают взрывоопасные помещения по двум степеням опасности: к I степени относится опасность, возникающая при нормальных, но редко повторяющихся производственных условиях или в случае аварий; II степень характеризуется длительным существованием опасности взрыва.

У нас разработаны специальные правила лишь для шахт, опасных по газу или пыли (Правила безопасности для электротехнических установок в шахтах), и для нефтяных промыслов. Для других аналогичных по опасности отраслей специально разработанных детальных правил нет. При выборе для них электрооборудования придерживаются в основном правил, применяемых в шахтах.

Наиболее разработанные в этом отношении германские нормы предъявляют следующие требования к машинам, работающим в опасной по взрыву среде. Электрические машины, трансформаторы сопротивления, выключатели, предохранители, переключатели и тому подобные аппараты, в которых в эксплуатации перерыв тока имеет место, должны только тогда применяться, если они соответствуют особым безопасным против взрыва конструкциям. Они должны удовлетворять следующим условиям:

1. Двигатели, у которых нет регулярного рабочего искрения (короткозамкнутые двигатели), должны по сравнению с нормальным выполнением получать повышенную надежность: 1) путем особой механической защиты; 2) путем повышения испытательного напряжения для изоляции на 50%; 3) снижением допускаемого нагрева на 25%.

Выполнение второго и третьего условий должно быть подтверждено соответствующим заводом или фирмой.

2. Двигатели с регулярным искрением (коллекторные двигатели, двигатели с кольцами) должны защищаться специальными мерами или выполняться во взрывобезопасном виде.

Таковыми двигателями являются двигатели, которые в отношении пространства, в котором они находятся, вполне закрыты и так охлаждаются, что в закрытом пространстве двигателя газ не может собираться; подводящие и отводящие трубы для охлаждающего воздуха должны быть выведены на свободу.

Взрывобезопасное оборудование начали изготовлять на наших заводах с 1931 г. До тех пор это оборудование ввозилось из-за границы. К настоящему времени наши заводы имеют большие достижения в конструировании и изготовлении взрывобезопасных двигателей и аппаратуры. К сожалению, приходится констатировать, что обслуживающий персонал горной, нефтяной и химической промышленности в отдельных случаях обращается с взрывобезопасным оборудованием несколько небрежно. В итоге применение взрывобезопасного оборудования вследствие небрежного обращения иногда не достигает цели, а иногда даже является причиной взрыва или какого-либо несчастного случая. Нашими заводами—ХЭМЗ, „Электросила“, им. С. М. Кирова, „Ревтруд“—выпущены специальные инструкции по эксплуатации взрывобезопасного электрооборудования.

Все образцы вновь выпускаемых у нас конструкций взрывобезопасного оборудования подвергаются специальному испытанию на безопасность в Макеевском научно-исследовательском институте. Испытание ведется в особой взрывной камере, наполненной взрывчатой смесью метана с воздухом. Этой смесью наполняется также и испытываемая оболочка. Воспламенение смеси внутри оболочки производится несколько раз под ряд. Лишь модель, выдержавшая подобное испытание, получает право на выпуск с завода-изготовителя. При массовом выпуске взрывобезопасного оборудо-

дования с завода это оборудование подвергается специально предусмотренным заводским испытаниям. Эти испытания включают в себя электрические испытания и гидравлическое опробование оболочки аппарата для определения ее прочности. Испытание производится по специальным нормам, утвержденным для взрывобезопасной аппаратуры.

Подробные сведения о конструкции взрывобезопасных двигателей и взрывобезопасной аппаратуре можно найти в выпущенном НКТП «Справочнике по взрыво-газобезопасному электрооборудованию заводов СССР» и в информационных материалах электротехнических заводов.

Вместо закрытия всего двигателя в случае асинхронных машин с кольцами иногда оказывается целесообразным покрыть колпаком лишь постоянно искрообразующие части—контактные кольца. Этот колпак рассчитывается на максимальное давление, которое может в нем возникнуть. Что же касается незакрытой части такого двигателя, то к ней предъявляются также специфические требования.

Нормы Союза германских инженеров резюмируют их следующим образом: 1) защита обмоток от случайных механических повреждений сплошными боковыми щитами; 2) покрытие вентиляционных отверстий сеткой; 3) увеличение межжелезного пространства на 50% для предупреждения образования искр при трении статора о ротор; 4) повышение прочности изоляции на 50% против нормальной; 5) уменьшение допустимого расчетного повышения температуры обмоток на 25%. Подобные двигатели наряду с закрытыми двигателями с охлаждаемым кожухом нашли применение на нефтяных промыслах в буровых Азнефти.

150. Основные указания по практическому выбору конструктивного способа защиты двигателей

Из предыдущего ясно, что вопрос о выборе того или другого конструктивного типа двигателя с точки зрения защиты его от окружающей среды может быть решен после детального рассмотрения эксплуатационных условий работы двигателя в установке. Хотя закрытые самовентилируемые двигатели обычно обеспечивают лучшую сохранность двигателей, без нужды на них итти не следует из-за удорожания двигателей. В одной и той же отрасли промышленности могут применяться как закрытые, так и открытые двигатели в зависимости от места их установки.

К отраслям промышленности, требующим очень большого числа закрытых двигателей или закрытых с самовентилиацией, следует отнести горюю промышленность, нефтяную, металлургическую, калийную, заводы взрывчатых веществ, заводы синтетического каучука, солеваренные заводы, содовые заводы, цементную промышленность, котельные помещения электрических станций. В табл. XX даны общие принципы защиты двигателей.

Таблица XX

Общие принципы защиты двигателей средней мощности от окружающей среды

Род помещения	Конструктивный тип двигателя
Сухое помещение без пыли, грязи и газов	Открытый
Сухое, непыльное помещение, но с опасностью попадания крупных или мелких предметов	Защищенный, открытый с добавочной спицей или сеткой
Пыльное помещение	Закрытый с вентиляцией
Влажное помещение	То же
Открытый воздух	Закрытый двигатель
Помещение с высокой температурой	Закрытый двигатель с огнеупорной изоляцией
Помещения очень сырые, содержащие едкие газы	Закрытый двигатель с противокислотной изоляцией
Взрывчатая атмосфера	Специальные закрытые взрывобезопасные двигатели

В табл. XXI даны разработанные Электропромом указания по выбору способа защиты двигателей типов, изготавливаемых советскими заводами.

В табл. XXII дана так же разработанная Электропромом классификация электродвигателей, выпускаемых заводами СССР по защите от окружающей среды.

Выбор типа электродвигателей в зависи

Характеристика помещения и среды		Открытый				Защищенный				Закры	
		нормальная изоляция		противосыростная изоляция		нормальная изоляция		противосыростная изоляция		нормальная изоляция	
		КЗ	КК	КЗ	КК	КЗ	КК	КЗ	КК	КЗ	КК
По электро-техническим правилам и нормам	Дополнительные данные о помеще-нии	ТАКЗ, ГАМ	АМ	ГАМ	АМ	АД, М-2, ТС, МА-200, МКБ (с)	МА-200, МКА (с)	АД, АДО, МА-200, МКБ (с), М-2	МА-200, МКА (с)	ТТ, МКБ (с), МА-140	МКА (с), МА-140
Сухое отопи-ваемое или не-отопливаемое	Электромашинные Прочие помещения	×	×			×	×				
Жаркое	До 30—35° С	×	×			×	×				
Жаркое	Выше 35°	0	0			0	0				
Сырое				×	×			×	×		
Особо сырое								0			
С непроводя-щей пылью	Пыль негорючая, легко удаляемая; пыль негорюч., тя-желю удаляемая	×	×			×	×	0		×	×
С проводящей пылью		0				0				×	×
Пожароопас-ное	1-я сте-пень									×	×
	2-я степень									×	×
	1-я степень									×	×
Взрывоопасное	2-я степень	×								0	0
	С едкими парами или газами										
Вне зданий	На открытом воз-духе			0	0			0	0		
	Под крышей										

Примечание: × — рекомендуемый; 0 — допускаемый; КЗ — с короткозамкнутым ротором; КК — с контактными кольцами.

Таблица XXI

мости от характера окружающей среды

тый		Закрытый с вентиляцией				Защит. от влажежа		Взрывобезопасный				Герметический
противо-сыростная изоляция		нормальная изоляция		противо-сыростная изоляция		противо-сыростная изоляция		нормальная изоляция		противо-сыростная изоляция		противо-сыростная изоляция
КЗ	КК	КЗ	КК	КЗ	КК	КЗ	КК	КЗ	КК	КЗ	КК	КЗ
МКБ (к) ТТ, МА-140	МКА (к), МА-140	МКБ (п), гАМО, МА-120	МКА (п), АМО, МА-200	МКБ (п), гАМО, МА-200	МКА (п) АМО, МА-200	МКБ (а), МА-200	МКБ (в), МА-200	ТАГ, БАО-2, МА-140, МА-170	МА-140	ТАГ, БАО, МА-140, МА-170	МА-140	АЗГ
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
0	0	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0	0
×	×	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0	×
×	×	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0	0

Таблица XXII
 Классификация электродвигателей по защите от окружающей среды

Выполнение корпуса	С нормальной изоляцией				С повышенной изоляцией			
	с короткозамкнутым ротором	с контактными кольцами	крановые	постоянного тока	с короткозамкнутым ротором	с контактными кольцами	крановые	постоянного тока
Открытые	ТАКЗ; гАМ МА-220	АМ МА-220	КТО КПД	МП-520 МП-500	гАМ МА-220	АМ МА-220	КТОШ КПД	МП-520 МП-600
Защитные	АД, АДФ ФАД, МА-200 ТС-1, ФТО МКБ(с); И-2	МА-200 МКА (с)		МА-500 МА-510 МП-550	АД, АДФ, ФАД МА-200; АД АДОФ, ФАДО МКБ (С), ТС-2, И-2	МА-200 МКА (с)		МП-500 МП-510 МП-550
Защищенные от дождя и брызг (каплеза)	МКБ (2), гАМ МА-200 МА-220	МКА (с) МА-200 АМ			МКБ (Б) МА-200	МКА (Б) МА-200		
Продуваемые	МКБ (п), гАМО МА-200 МА-220	МКА (п), АМО МА-200 МА-220		МП-510 МП-600	МКБ (п), гАМО МА-200 МА-220	МКА (п) ГАМО МА-200 МА-220		МА-510 МП-600
Закрытые	МКБ (к) ТТ МА-140	МКА (к) МА-140	КТК КТ КПД	МП-500 МП-510 МП-550	МКБ (к) ТТ, МА-140	МКА (к) МА-140	КТК КТШ КПД	МП-500 МП-510 МП-550
Взрывобезопасные	ТАГ, БАО-2 МА-140 МА-170	МА-140		МП-500	ТАГ, БАО-2 МА-140 МА-170	МА-140		МП-500
Герметические	АЗГ							

ГЛАВНЕЙШИЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

	A			
<i>A</i>		— живая сила, энергия, работа.	<i>F_s</i>	— статическое усилие механизма при линейной скорости <i>v</i> .
<i>A</i>		— теплоотдача.	<i>F_N</i>	— нормальное статическое усилие.
<i>a</i>		— ускорение.	<i>F_m</i>	— статическое усилие на валу двигателя.
$a \doteq \frac{q_{Nc}}{q_{No}}$		— отношение постоянных и переменных потерь в двигателе при номинальной нагрузке.	<i>f</i>	— частота.
	B		J	
<i>B</i>		— электромеханическая постоянная электропривода.	<i>J</i>	— момент инерции.
<i>b</i>		— реактивная проводимость намагничивания.	<i>J_d</i>	— момент инерции двигателя.
	C		<i>J_m</i>	— момент инерции механизма, отнесенный к валу двигателя.
<i>C</i>		— теплоемкость машины.	<i>J_m</i>	— момент инерции механизма по его валу.
<i>c</i>		— постоянные коэффициенты.	<i>J_r</i>	— расчетный приведенный момент инерции системы.
	D		I	
<i>D</i>		— диаметр инерции.	<i>I</i>	— сила тока, действующее значение силы переменного тока.
<i>d</i>		— диаметр.	<i>i</i>	— мгновенное значение силы переменного тока.
	E		<i>i</i>	— ток шунтового возбуждения.
<i>E</i>		— электродвижущая сила, действующее значение э. д. с. переменного тока.	<i>i_ψ</i> и <i>i_ψ%</i>	— сила тока в относительных единицах и процентах.
<i>e</i>		— мгновенное значение э. д. с.	<i>I_a</i>	— ток якоря.
	H		<i>I_k</i>	— ток короткого замыкания.
<i>H</i>		— высота.	<i>I_m</i>	— средняя сила тока.
<i>h</i>		— давление.	<i>I_{max}</i>	— максимальная сила тока.
	F		<i>I_N</i>	— номинальная сила тока.
<i>F</i>		— сила, усилие.	<i>I₀</i>	— сила тока холостого хода.
<i>F_d</i>		— усилие двигателя.	<i>I_p</i>	— ток в последователь-
<i>F_y</i>		— динамическое усилие.		

	ном сопротивлении главной цепи.
I_s	— ток в шунте главной цепи, соответствующий статическому моменту исполнительного механизма.
I_{μ}	— намагничивающий ток.
I_{σ}	— эквивалентная сила тока.
К	
k	— постоянные коэффициенты.
k_1	— коэффициент пропорциональности между M и I .
k_2	— коэффициент пропорциональности между E и n .
k_1, k_2, \dots, k_n	— передаточные числа от двигателя к отдельным осям.
k'_1, k'_2, \dots, k'_n	— передаточные числа между отдельными осями.
L	
L	— длина, путь.
$l, l\%$	— путь в относительных единицах, в процентах.
L	— коэффициент самоиндукции.
M	
m	— масса, число фаз.
m'	— приведенная масса.
M	— вращающий момент.
M_a	— асинхронный момент.
M_d	— момент двигателя.
M_m	— средний момент двигателя.
M_j	— динамический момент.
M_m	— статический момент механизма, приведенный к валу двигателя.
M_m	— максимальный момент асинхронной машины.
M_{\max}	— максимальный момент.
M_N	— номинальный момент.
M_{Nm}	— нормальный момент механизма на валу двигателя.
M_{Np}	— нормальный момент гередач.
M_{Npv}	— нормальный момент переменных потерь в передачах.

M_o	— момент холостого хода.
M_p	— момент потерь в передачах.
M_{pc}	— момент постоянных потерь в передачах.
M_{pv}	— момент переменных потерь в передачах.
M_{pp}	— пусковой момент.
M_s	— статический момент механизма на его валу, синхронный момент.
M	— коэффициент взаимоиндукции.

N

N	— проходимый двигателем или механизмом путь в оборотах.
N и $N\%$	— проходимый двигателем или механизмом путь в относительных единицах и в процентах.
n	— число оборотов в минуту.
n_c	— скорость по естественной характеристике.
n_u	— скорость по искусственной характеристике.
n_0	— число оборотов в минуту идеального холостого хода, синхронное число оборотов в минуту.
n_N	— номинальное число оборотов в минуту.
n_s	— число оборотов двигателя при статическом моменте на его валу.

P

P	— мощность.
p и $p\%$	— мощность в относительных единицах и в процентах.
P_d	— мощность двигателя.
P_j	— динамическая мощность.
P_m	— статическая мощность механизма, на валу двигателя, средняя мощность.
P_{\max}	— максимальная мощность.
P_N	— номинальная мощность.
P_{pp}	— пусковая мощность.
P_s	— статическая мощность механизма.

Q

Q — теплоотдача в калориях, усилии.

q — потери в электрических машинах.

q_m — средние потери за цикл.

q_N — потери при номинальной нагрузке.

q_{Nc} — постоянные потери при номинальной нагрузке.

q_{Nv} — переменные потери при номинальной нагрузке.

q_c — постоянные потери.

q_v — переменные потери.

R

R — радиус.

R — сопротивление главных цепей.

r — сопротивление цепи возбуждения шунтовой машины.

R_a — сопротивление обмотки якоря.

R_d — добавочные сопротивления.

R_p — последовательное сопротивление главной цепи.

R_s — сопротивление шунта в главной цепи.

R_N — нормальное сопротивление.

R_1 — сопротивление первичной цепи.

R_2 — сопротивление вторичной цепи.

S

s — скольжение.

s_a — скольжение по естественной характеристике.

s_u — скольжение по искусственной характеристике.

s_m — опрокидывающее скольжение.

s_N — номинальное скольжение.

s_0 — скольжение холостого хода.

T

T — постоянная электромагнитной инерции (электромагнитная постоянная).

T

T — кинетическая энергия системы.

t — время.

t_s — длительность одного цикла.

t_0 — время остановки.

t_p — время пуска.

t_{p0} — время пуска вхолостую.

t_t — время торможения.

t_{t0} — время торможения вхолостую.

t_y — время установившейся работы.

U

U — напряжение, действующее значение напряжения переменного тока.

u — мгновенное значение напряжения.

U_d — напряжение на зажиме двигателя.

U_N — номинальное напряжение.

U_r — напряжение ротора.

U_s — напряжение статора.

V

v — скорость.

W

w — число витков.

X

x — реактивное сопротивление.

Y

y — число ускорений в одном цикле.

Z

z — полное сопротивление переменному току.

Z — допустимое число включений в час.

Греческие буквы.

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varphi$ — углы, коэффициенты.

α и $\alpha\%$ — живая сила в относительных единицах и в процентах.

α — коэффициент форсировки.

β — удельный вращающий момент переменных потерь в передачах.

θ	— превышение температуры.
δ	— удельный вес.
$\varepsilon, \varepsilon\%$	— э. д. с. в относительных единицах и в процентах.
$\zeta, \zeta\%$	— относительная продолжительность включения.
λ	— перегрузочная способность.
$\mu, \mu\%$	— вращающий момент в относительных единицах и в процентах.
μ	— коэффициент трения.
$\gamma, \gamma\%$	— число оборотов в минуту в относительных единицах и в процентах.
$\rho, \rho\%$	— сопротивление в относительных единицах и в процентах.
ρ	— радиус инерции.
τ	— время в относительных единицах.
τ	— коэффициент рассеяния.
$u, u\%$	— напряжение в относительных единицах и в процентах.
θ	— постоянная времени тепловой инерции, угол сдвига между осью полюсов и осью результирующего потока в синхронной машине, угол сдвига между э. д. с. роторов асинхронных машин в синхронной связи.
η	— коэффициент полезного действия.
Φ	— магнитный поток.
Сокращенные обозначения журналов и фирм.	
Обозначения иностранных журналов	
AEG Mitt.	— AEG Mitteilungen.
Arch. f. El.	— Archiv für Elektrotechnik.

BBC Nachr.	— Brown-Boveri Nachrichten, Mannheim.
El. J.	— The Electric Journal, Pittsburgh.
El. Eng.	— The Electrical Engineering, New-York.
ETZ	— Elektrotechnische Zeitschrift.
E. u. M.	— Elektrotechnik und Maschinenbau.
El. W.	— The Electrical World.
JAIEE	— Journal of American Institute of Electrical Engineers, New-York.
GER	— General Electric Review, Schenactady.
Jr. St. Eng.	— Iron Steel Engineer, Pittsburgh.
Siem. Zt.	— Siemens-Zeitschrift.
RGE	— Revue Générale d'Electricité.
Tr. AIEE	— Transactions of American Institute of Electrical Engineers.

Обозначения русских журналов.

Э.	— Электричество.
В. Э.	— Вестник электропромышленности.
А. и Т.	— Автоматика и телемеханика.

Обозначения иностранных электротехнических фирм

AEG	— Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft, Германия.
BBC	— Brown, Boveri & Co— Швейцария, Baden; Германия, Mannheim.
GE	— General Electric Co, США.
MV	— Metropolitan Vickers, Англия.
BTH	— British Thomson Houston, Англия.
TH	— Thomson Houston, Франция.
Al. Ch.	— Allis-Chalmers, США.
W	— Westinghouse, США.

СПИСОК ОСНОВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

1. В. К. Попов. Применение двигателей в промышленности в 3 частях, 1932—1939.
2. С. А. Ринкевич. Теория электропривода, 1938.
3. Р. А. Аронов. Электрооборудование промышленных приводов, 1936.
4. В. К. Попов и Д. В. Васильев. Основы автоматики электропривода, 1938.
5. В. К. Попов и И. И. Казанцев. Основы построения схем автоматизированного привода, 1939.
6. Р. А. Аронов. Автоматическое управление электроприводами, ч. I, 1935.
7. С. Н. Вешеневский. Расчет сопротивлений для электродвигателей, 1938.
8. А. В. Фатеев, Б. И. Норневский. Сборник примеров и задач по теории электрического привода, 1939.
9. И. И. Дорофеев и С. П. Зефиоров. Электрификация исполнительных механизмов, 1935.
10. Гордон Фокс. Практика электрического привода, 1934.
11. П. Гарвуд. Управление электродвигателями, 1938.
12. Х. Г. Вайсман. Автоматика, ч. I, 1937.
13. Д. В. Васильев. Электрические машины в синхронной связи.
14. К. Хэнней. Электронные и ионные приборы в промышленности, 1937.
15. Ф. Г. Гулликсен и Е. Г. Веддер. Промышленная электроника.
16. И. В. Фатеев. Электрическое оборудование механизмов внутривзаводского транспорта, 1936.
17. Н. П. Кунницкий. Электрооборудование подъемно-транспортных сооружений в 2 частях, 1937—1940.
18. С. А. Пресс. Электрическое оборудование металлорежущих станков, 1940.
19. С. Шибелер. Электродвигатели для прерывистой работы и выбор привода подъемно-транспортных устройств, 1931.
20. Н. П. Кунницкий. Электрооборудование прокатных и термических цехов, 1938.
21. G. Fox. Principles of electric motors and control, New-York, 1923.
22. H. D. James. Controllers for electric motors, 1927.
23. W. Wilson. Electric control gear and industrial electrification, London, 1927.

Глава I

24. Попов. Современные тенденции в электросиловом оборудовании промышленных предприятий, Э., 1927, № 7—8.
25. Гейлер. Современное развитие электрического привода, Э., 1935, № 11.
26. Гейлер. Обзор развития электропривода за 1935 г., Э., 1936, № 5—17.

27. Фридкин. Дуговые статоры, как электрические аппараты для вращения рабочих машин, Э., 1937, № 7—8.
28. Товстопапов, Морозов и Голован. Проблемы развития электропривода в третьей пятилетке, Э., 1939, № 4.
29. Гейлер. Прогресс современной техники электропривода, Э., 1939, № 4.
30. Пóпов. Ближайшие задачи советского электропривода, ВНИТОЭ, Ленинград, 1939.
31. Попов. Современное состояние общей теории электропривода и ее задачи, Э., 1940, № 1.
32. F. Oertel. Wege und Ziele der heutigen Elektroantriebstechnik. ETZ, 1936, № 49 и 50.
33. Попов. Направления развития современного автоматизированного электропривода. Изв. ОТН Академии наук СССР, 1941 № 3.

Глава II

34. Енько и Юдицкий. Электротехнические нормы и вопросы коммутации, Э., 1936, № 5.
35. Luke. Heating of Railway Motors in Service and in Test-Floor Runs. JAIEE, 1922, стр. 165.
36. Алябьев. Тепловой расчет якорей машины постоянного тока уточненным методом, В. Э., 1937, № 2.
37. H. Kother. Zeichnerische Verfahren zur Vorausbestimmung der Betriebmäßigen Erwärmung von elektrischen Maschinen, insbesondere Bahnmotoren. ETZ, 1937, 632—636.
38. Голоднов. Определение среднеквадратичного тока при массовых испытаниях двигателей в промпредприятиях, В. Э., 1938, № 7—9.
39. Корицкий. Определение среднеквадратичной сложного графика, В. Э., 1942, № 10.
40. Барский. Теория нагрева и выбор мощности асинхронного электродвигателя шахтной подъемной машины (диссертация, Харьков, 1937).
41. F. Unger. Überlastbarkeit von Elektromotoren mit periodisch wechselnden Belastung, Arch. f. El., 1938, 32 B, 622—626.

Глава III

42. Вешеневский. Об электромеханических расчетах для электроприводов Э., 1939, № 4.
43. Проф. Бравин. Метод расчета механических приводов с учетом сил инерции, Москва, 1938.
44. Ракига. Общий метод расчета электропривода с переменным передаточным числом и переменными массами, В. Э., 1940 г., № 5—6.
45. Казанцев. Учет механических потерь в уравнении движения электропривода, Э., 1939, № 9.
46. Niemann. Fördertechnik, 1936, № 23/24.
47. Пресс. О потерях в передаточных механизмах подъемных и транспортных машин, Труды ЛИИ, 1938 г.
48. Целиков. Расчет и конструирование прокатных машин и орудий, Москва, 1938, гл. VIII.
49. Ирошников. Динамические расчеты электропривода, В. Э., 1938, № 12.
43. Atkinson and Downee. The acceleration-oscillogram method of motor torque measurement, El. Eng., 1942, June, 7—9.

Глава IV

50. Арон о в. Рациональные методы построения искусственных характеристик машин постоянного тока. Сборник ХЭТИ, 1937, вып. IV.
51. Арон о в. Энергетические процессы при торможении противотоком, Сборник ХЭТИ, 1936, вып. II.
52. Шмуклер. Энергетические процессы при электрическом торможении двигателей постоянного тока. Там же.
53. Хализев. Практические методы построения механических характеристик шунтовых двигателей, В. Э., 1936 г., № 5.
54. Blittersdorf. Stabilitätsuntersuchungen an BBC Gleichstrommotoren. BBC Nachr., 1936 Apr./Juni.
- ✓ 55. Горохов и Зимин. Некоторые особенности характеристик шунтового двигателя постоянного тока, В. Э., 1938, № 6.
56. Merrill. The speed-torque curves of a series motor. GER, 1933, № 10.
57. Бегишев. Механические характеристики серийных двигателей в сложных схемах включения, Труды ЛИИ, 1938 г.
58. Wahl and Kilgore. Transient starting torques in induction motors. Tr. AIEE, 1940, т. 59, 603—607.
59. Рихтер. Электрические машины, т. IV, Ленинград, 1939, стр. 32—51.
60. Lawson. Adapting a-c. motors to machine-tool drives Machinery, N.-Y., 1938, № 4.
61. Каялов. К расчету асинхронных двигателей на механическую перегрузку, В. Э., 1937 г., № 1.
62. Каялов. Работа асинхронного двигателя при вращающем моменте, близком к опрокидывающему, В. Э., 1937, № 7.
63. Ермолин. К вопросу о моменте вращения асинхронной машины, В. Э., 1937, № 3.
64. Енько. К вопросу о расчете пусковых реостатов и определении времени разбега асинхронного двигателя, В. Э., 1937, № 4.
65. Голован. Дополнительные главы по теории электропривода, Москва, 1936, гл. I и II.
66. Гейлер. О переходном режиме асинхронного двигателя при внезапном изменении нагрузки на валу, Э., 1937, № 8.
67. Гейлер. Формула для крутящего момента асинхронного двигателя, В. Э., 1938, № 12.
68. Сорокер. О формуле для крутящего момента асинхронного двигателя, В. Э., 1939, № 9.
69. Урусов. О вращающем моменте двигателя с глубокими пазами, В. Э., 1939, № 4.
70. Пресс. Применение короткозамкнутых асинхронных двигателей для динамического режима работы (доклад на конференции ВНИТОЭ. 1939, Ленинград).
71. Якобсон. Номограмма для построения характеристик асинхронных двигателей, Э., 1940, № 3.
72. Вологдин. Выпрямители, 1932 (Библиография)
73. Moftis. Application of copper oxide rectifiers, El. Eng., 1939, № 3.
74. Левинсон и Дундаев. Мощные медно-закисные выпрямители, Э., 1939, № 6.
75. Moncada. Untersuchungen über den selbstregten Asynchrongenerator. Arch. f. El., 1937, № 1.
76. Wagner. Self-excitation of induction motors, El. Eng., 1939, № 2.

77. Будзко и Горяинов. Самовозбуждающийся асинхронный генератор, Э., 1939, № 8.
78. Ve'ndz. Comparison of methods of stopping squirrel-cage induction motors, El. Eng., 1938, Sept.
79. Weissheimer. Die Asynchronmaschine mit Gleichstromerregung als Bremse. Arch. f. El., 1934, т. 28.
80. Harrel and Houch. D. C. Braking of induction motors, El. Eng., 1935, т. 54, № 5; 1936, стр. 167.
81. Садовский. Торможение асинхронных двигателей постоянным током, Э., 1934, № 19.
82. Николаичук. Динамическое торможение асинхронных двигателей, Э., 1935, № 6. В. Э., 1941, № 4.
83. Касьянов. Динамическое торможение асинхронных двигателей, В. Э., 1936, № 8.
84. Касьянов. Расчет динамического торможения асинхронных двигателей, В. Э., 1936, № 9.
85. Губенко. Индукционная машина в тормозном режиме, Труды САИИ, 1941.
85. Губенко. Торможение индуктивного двигателя при помощи синхронного возбудителя. Труды САИИ, 1941.
86. Kassianoff. Die Vollpolsynchronmaschine bei Belastung auf eine äussere Impedanz, E. u. M., 1936, № 12.
87. Аглицкий. Работа трехфазной индукционной машины в тормозном режиме по схеме SSW, Э. 1933, № 19.
88. Ракига. Динамическое торможение асинхронных двигателей, В. Э., 1940, № 10.
89. Linville. Starting performance of salient pole synchronous motors. Tr. AIEE, 1930, т. 49.
90. Kilbourne and Ferry. Dynamic breaking of synchronous machines, El. Eng., 1932, № 12.
91. Kilbourne. Improved performance of synchronous motors with respect to starting and stopping, GER, 1932, № 11.

Глава V

92. Попов. Обобщенная классификация нагрузочных диаграмм электропривода. Э., 1936, № 23.
93. Гейлер. Новая форма уравнения движения электропривода, Э., 1936, № 18.
94. Орлов. Номограмма для определения составляющих обобщенного уравнения моментов электропривода, Э., 1939, № 5.
95. Попов. Теория работы и методы построения нагрузочных диаграмм не-реверсивных прокатных двигателей с маховиком, Э., 1929, № 1—2.
96. Гейлер. К теории работы электропривода с маховыми массами, Э., 1935, № 20.
97. Шубенко. Работа асинхронного двигателя с маховыми массами, Э., 1936, № 15—16.
98. Дунаевский. Новый метод выбора маховых масс и мощности привода с асинхронным двигателем при двухчастковом графике ударной нагрузки, В. Э., 1938, № 6.
99. Акад. Никитин. О динамическом равновесии систем с непрерывно меняющейся нагрузкой, Изв. ОТН Академии наук СССР, 1941. № 10.
100. Попов и Бегишев. Выбор между маховиковым и безмаховиковым приводом для не-реверсивных механизмов с ударной нагрузкой, Труды ЛИИ, 1936, № 5.

101. Попов. Работа асинхронного двигателя группы Леонарда-Ильгнера, служащей для питания электрического реверсивного прокатного стана, Э., 1930, № 23—24.
102. Schaelschlin. The liquid rheostat comes into its own. El. J., 1938, № 10.
103. Попов. О постоянной времени механических переходных режимов электропривода, Труды ЛИИ, 1940.
104. Губенко. Нахождение мощностей двигателей для механизмов с кривошипной передачей, Сборник ХЭТИ, вып. II, 1936.
105. Савинков. Графический метод построения диаграмм нагрузки привода с маховой массой, В. Э., 1934, № 10.
106. Савинков. О методах построения диаграмм нагрузки привода с маховой массой, В. Э., 1935 № 2.
107. Голован. Электрооборудование кузнечно-прессовых машин, 1936.
108. Губенко. Выбор маховика и построение нагрузочных диаграмм для группы Леонарда-Ильгнера, Сборник ХЭТИ, вып. II, 1936.
109. Левин и Рудаков. Определение индуктивности якоря машин постоянного тока, Э., 1940, № 7.
110. Trettin. Das schalten großer Gleichstrommotoren ohne Vorschaltwiderstände, ETZ, 1912.
111. Зильберман. Переходные режимы в схемах с шунтовыми двигателями постоянного тока при постоянном статическом моменте и постоянном потоке возбуждения. Труды ЛИИ, 1937, № 5.
112. Эфрос. Пуск, реверс и торможение двигателей постоянного тока, В. Э., 1937, № 10.
113. Глобус. Методы расчета неустановившихся режимов работы приводов постоянного тока, Вестник ХЭТЗ, 1937; В. Э., 1940. № 5.—6.
- ✓ 114. Юдицкий. Безреостатный пуск двигателей постоянного тока, Э., 1938, № 12; В. Э., 1939, № 1 и 5.
115. Umansky and Linville. Speed transients of d. c. rolling mills motors, El. Eng., 1935, April.
116. Андреев. Переходные процессы привода непрерывных трубопрокатных станов, Диссертация ЛИИ, 1939.
- ✓ 117. Стефанович. Электрическая схема замещения электродвигателей постоянного тока. Доклад на конференции ВНИТОЭ, Харьков, 1938.
118. Рихтер. Электрические машины, 1935, т. I, стр. 505—508.
119. Кожевников. Аналитический расчет переходных режимов крановых серийных двигателей, В. Э., 1938, № 4.
120. Вешеневский. Электрический привод безмаховиковых неререверсивных ножниц блуминга, В. Э., 1936, № 10 и 11.
- ✓ 121. Акад. Никитин и Кунццкий. Устойчивость работы шунтовых двигателей постоянного тока. Изв. ОТН Академии наук СССР, 1940, № 9 и 10.
122. Полтава. Переходные режимы электропривода с компаундными двигателями постоянного тока. Диссертация ЛИИ, 1940.
- ✓ 123. Тягульский. Переходные режимы шунтового двигателя при ускорении его ослабленным магнитным потоком, В. Э., 1942, № 2.
124. Акад. Крылов. Лекции о приближенных вычислениях, 1933.
125. Рунге. Графические методы математических вычислений, 1932.
126. Горт. Дифференциальные уравнения, 1933 (главы VI и VII).
127. Булгаков. Пуск и торможение короткозамкнутых двигателей под нагрузкой, Э, 1938, № 6.
128. Гейлер. О переходном режиме асинхронного двигателя при внезапном изменении нагрузки на валу, Э., 1937, № 8.

129. Гейлер. Асинхронные двигатели в электроприводах с переменной нагрузкой, В. Э., 1939, № 4 (см. также дискуссию Каялов-Гейлер, В. Э., 1941 № 5).
130. Березниковский. Применение короткозамкнутых асинхронных электродвигателей для работы с повторно-кратковременной нагрузкой (Доклад на конференции ВНИТО, Э., Ленинград, 1939).
131. Scharrl. Drehstrommotoren für hohe Schalhäufigkeit, Die Werkzeugmaschinen, 1937, № 17.
132. Пресс. Применение короткозамкнутых асинхронных двигателей для динамического режима работы (Доклад на конференции ВНИТО, Э., Ленинград, 1939).
133. Пресс. Приближенный способ расчета электродвигателей для повторно-кратковременного режима, Труды ЛИИ, 1940, № 3.
134. Костенко. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменной частоте, Э., 1925, № 2.
135. Товстопалов. Одиночный привод роликов рольгангов, В. Э., 1935, № 11.
136. Садовский. Неустановившиеся режимы асинхронных двигателей при переменной частоте, В. Э., 1937, № 3.
137. Булгаков. Пуск и торможение асинхронных двигателей переменной частотой, В. Э., 1939, № 1.
138. Wickler. Drehstromkurzläufermotoren für den Einzelantrieb von Arbeitsrollgängen, AEG Mitt., 1938, Okt.
139. Попов. Работа синхронного двигателя с маховиком при приводе поршневого компрессора, Э., 1931, № 14.
140. Еремеев. Маховой момент агрегата, синхронный двигатель и компрессор, Э., 1935, № 21.
141. Putman. Calculation of Flywheels for air compressors, Trans. of Amer. Soc. Mec. Eng., 1929.
142. Herlitz. On the oscillation certain electrical or mechanical system due to periodic impressed force, GER, 1922, 686—689.
143. Stevenson. Error due neglecting electrical forces in calculating flywheels for reciprocating machinery driven by synchronous motors, GER, 1922, 690—699.
144. Göschel, Lampel. Elektrisch angetriebene Kolbengasverdichter in chemischen Großanlagen, Siem. Zt, 1938, August.
145. Ziwschitz. E. u. M. 1934, H. 14.
146. Мажуга. О маховых моментах синхронных двигателей, вращающих воздушные компрессора, В. Э., 1938, № 7.
147. Raymond. Planung und Betriebsergebnisse von Motoren zum Antrieb von Koltengasverdichtern. Siem. Zt, 1938, August.
148. Kilbourne and Ferry. Dynamic braking of synchronous machines, El. Eng., 1932, 832—846.
149. Edgerton and Foumagière. Synchronizing salient pole motors, El. Eng., 1932, 430—431.
150. Матюхин, Рогачев. Динамическая устойчивость синхронных двигателей, В. Э., 1939, № 7; Э., 1940, № 7.
151. Постников. К вопросу о перегрузочной способности синхронного двигателя при толчкообразных нагрузках. Труды ЛИИ, 1938, № 2.
- 151'. Апаров и Лобшин. Критерий устойчивости серии синхронных двигателей при толчках нагрузки, Э., 1941, № 2.

Глава VI

152. Товстопалов. Совместная работа двух серийных двигателей на одном валу. Сборник МЭИ, 1937.
- 152'. Головин. Работа двух электрических машин через механический дифференциал, В. Э., 1942, № 7—8.

153. Сергеев. Совместная работа крановых сериесных двигателей по схеме с уравнивающим соединением для выравнивания скорости. Труды ЛИИ, 1938, № 7.
154. Колытов. О проектировании двухмоторных механизмов на основе анализа аварий с различными кранами (Доклад на конференции ВНИТО, Э., Харьков, 1938).
155. Rhea. The three field d-c generator, GER., Nov. 1934.
- 155'. Богданов. Статические характеристики системы Леонарда с трехобмоточным генератором, В. Э., 1940, № 9.
156. Бычков и Фурдуйев. Электропривод по системе Леонарда для ответственных вспомогательных механизмов вспомогательных приводов реверсивных станов (работа МЭИ, 1939).
157. Морозов. Теория электропривода реверсивных прокатных станов (соответствующие материалы опубликованы в Э., 1935, № 3; 1936, № 12; Э., 1938, № 6; В. Э., 1937, № 7).
158. Чиликин. Сравнения некоторых схем быстрого возбуждения генератора Леонарда (Диссертация, МЭИ, 1938).
159. Драников. Теоретическое и экспериментальное исследование некоторых схем быстрого возбуждения генератора Леонарда (Диссертация, ЛИИ, 1939).
160. Мезенцев. Переходные режимы двигателей индивидуального электропривода валков слябинга при работе до основной скорости (Диссертация, МЭИ, 1938).
161. Гейлер. Основы расчета электроприводов по схеме Леонарда, В. Э., 1937, № 8.
162. Гейлер. Форсировка возбуждения генераторов в системе Леонарда, Э., 1937, № 9—10.
163. Морозов, Козлов. Квадратичная система возбуждения электрических машин, Э., 1938, № 6.
164. Зиверт. Влияние изменения возбуждения двигателя, работающего по схеме Леонарда на число его оборотов и напряжение генератора, Э., 1933, № 18.
165. Акад. Никитин и Кунидкий. Устойчивость работы системы Леонарда, Изв. ОТН Академии наук СССР, 1941, № 9, 19.2, № 3—4.
166. Coldwell and Foghols. Electrical drives for wide speed ranges. El. Eng. 1942, Febr., 54—56.
167. Тищенко. Резервы повышения производительности современного реверсивного прокатного стана. Вестник ХЭТ, 1937, № 4.
168. Мариниченко и Филин. Работы ХЭТЗ в области главного привода реверсивных прокатных станов (Доклад на совещании, Харьков, 1938).
169. Резолюции Всесоюзного совещания по электрооборудованию металлургических заводов, Харьков, 1938.
170. Garmann. Thyatron control of d-c motors. GER, 1938, Апрель, 202—208; El. Eng., 1938, Июнь, 335—342.
171. Alexanderson, Edwards, Willis. Electronic control of motor speed. El. Eng., 1938, 343—354.
172. Anschütz. Über die Verwendung von Stromrichtern für motorische Antriebe, AEG Mitt., 1937, H. 6, 208—216.
173. Попов. Переходные режимы в автоматизированном пониж. приводе. А. и Т., 1941, № 3.
174. Булгаков. Переходные режимы электропривода с управляемым выпрямителем. Бюллетень ВЭИ, 1941, № 3.
175. Schilling. Zur Regelung von Gleichstrommotor über gittergesteuerte Gleichrichter, Arch. f. El., B. 29, 9 H., 1935, 622—631.

176. Бугаев, Эттингер, Янчук. Рабочие характеристики электропривода с управляемыми ртутными выпрямителями и двигателем постоянного тока, В. Э., 1938, № 3, 22—28.
177. Те же авторы. Компаундирование и защита электроприводов с управляемыми ртутными выпрямителями, В. Э., 1938, № 12, 1—8.
178. Бугаев и Эттингер. Схема электропривода шахтной подъемной машины с управляемыми ртутными выпрямителями, В. Э., 1939, № 7, 6—10.
179. Завалишин и Вегнер. Новые схемы вентильных двигателей, Э., 1936, № 3, 6—15.
180. Вегнер. Современное состояние проблемы вентильных двигателей, Э., 1938, № 6.

Глава VII

181. Байдак. Исследование асинхронного короткозамкнутого двигателя с переключением обмотки статора на три скорости. В. Э., 1938, № 7.
182. Uman sky. Direct current drives for runout tables and coils. Jr. St. Eng., 1938, April.
183. Могилевкин и Розин. Двухроторные двигатели и их характеристики, В. Э., 1939, № 1.
184. Маковский. Электродвигательный привод современных деревообделочных станков, В. Э., 1935, № 10.
185. Гланц и Кузнецов. Коллекторные двигатели завода „Электросила“ им. С. М. Кирова, В. Э., 1939, № 1.
186. Electricité, 1937, февраль, 84—87.
187. Zabransky. Die wirtschaftliche Regelung von Drehstrommotoren durch Gleichstromkaskaden Berlin, 1927.
188. Weiler. Beschleunigungsvorgänge in Drehstrom—Gleichstrom Kaskaden, E. u. M., 1922, 121—123.
189. Clymer. Large adjustable speed wind tunnel drive, El. Eng., 1942, March, 156—158.
190. Dichey, Laffon, Kilgore. Variable speed drive for US Army Air, Corporation wind tunnel at Wright Field, Dayton, Ohio, El. Eng., 1942, March, 156—158.
191. Liwschitz, Kilgore. A study of the modified Kraemer on asynchronous-synchronous cascade, El. Eng., 1942.
192. Liwschitz. Damping and synchronizing torque of the double fed asynchronous machine, Tr. AIEE, 1941, т. 30, 923—924.

Глава VIII

193. Рывкин. Электрооборудование разводного моста, В. Э., 1933, № 12.
194. Никифоров. Электротехнический вал, В. Э., 1934, № 2.
195. Садовский. Согласованное вращение асинхронных двигателей, Э., 1935, № 22.
196. Садовский. Группа асинхронных двигателей в схеме электрического вала, Э., 1937, № 14.
197. Садовский. Общая теория „электрического вала“, В. Э., 1938, № 3, 35—36.
198. Штурман. Индукционные машины в системах электрических валов, Харьков, 1938.
199. Nowaski. Induction motors as selsyn drives, El. Eng., 1933, декабрь, 848—853.
200. Sornet. Les télécommandes électriques et leur application au pointage соитини, RGE, 1934, 15 апрель, 501—516.

201. Sornein, La jonction électrique „Siemens“ et ses applications aux télécommandes, RGE, 1933. m. 33, 651—663, 687—697.
202. Schuisky. Über den Gleichlauf von Induktionmotoren. Arch. f. El., 1934, B. 28, 591—602.
203. Лернер. Основные вопросы электропривода ротационных машин, Диссертация, МЭИ, 1939.
204. Лернер. Синхронизация вращения коллекторных двигателей типа Рихтера-Шраге, Э., 1940, № 7.
205. Лернер. Получение устойчивости низкой скорости и синхронного вращения при питании машины Шраге постоянным током, В. Э., 1940, № 11.
206. Wenner and Lunge. Voltage regulating equipment characteristics as a guide to application, GER, 1938, июнь, 273—279.
207. Столовичкий. Новый быстродействующий автоматический регулятор напряжения реостатно-вибрационного типа, В. Э., 1934, № 1.
208. Эkelov. Автоматический регулятор скорости ХЭМЗ для многодвигательного секционного привода, В. Э., 1940, № 8.
209. Frazier, Eisler, Frontz. Precise speed control for d-c machines, El. Eng., 1935, март, 307-312.
210. Ratzke. Astatistische Drehzahlregelung von Gleichstrommotoren mit Elektropeñöhren, Arch. f. El., 1935, B. 29.
211. Файнберг. Совместная работа двигателей постоянного тока при управлении механизмами, В. Э., 1942, № 3.
212. Коган. Результаты промышленного испытания системы статического авторегулирования скорости с ионными преобразователями для многодвигательного привода бумагоделательных машин, А. и Т., 1940, № 4.
213. Попов. Синхронизация скорости двигателей постоянного тока, В. Э., 1938, № 2, 11—14.
214. Попов. Сельсина-угольный регулятор скорости для бумагоделательных машин, В. Э., 1940, № 3.
215. Сабинин. Амплидин и его применение, Э., 1940.
- 215¹. Graubeal. Steady-state theory of the amplidyne generator, El. Eng., 1942, Oct, 750—756. (с библиографией).
216. Schoultz, Edwards и др. Industrial application of amplidyne generator, GER, 1940, March.
217. Репуон. Electrical features of modern cold strip mills, Ir. St. Eng., 1934, March.
218. Mohler. Gauge control for cold strip mills. Ir. St. Eng., 1939, Dec.
219. Rhea and Leding. Acceleration of tandem cold strip mill, Ir. St. Eng., 1939.
220. Богданов. Анализ процессов регулирования реверсивных станов холодной прокатки, В. Э., 1939, № 9.
221. Корж и Бобров. Система управления реверсивными станами холодной прокатки, В. Э., 1939, № 12.
222. Фейнберг. Электрооборудование станов холодной прокатки, В. Э., 1938, № 11.
223. Файнберг. Автоматизация регулирования натяжения для прокатных станов, В. Э., 1940, № 2.
224. Пантюшев. Врубная машина с электроавтоматической регулировкой скорости подачи. Э., 1936, № 5.—
225. Дунаевский. О врубной машине с автоматической регулировкой скорости подачи. Э., 1936, № 19.
226. Безродный. Симпатическое управление электроприводами В. Э., 1938, № 12.

227. Назел. Theory of servomechanisms, Journal of Franklin Institute, 1934, сентябрь, 279—331 (с библиографией).
228. Назел. Design and test of high performance servomechanisms. Там же, 1934, ноябрь, 543—580.
229. Соколов. Аналитическое исследование переходных процессов в приводах с электромагнитными муфтами, Труды ЛИИ, 1938, № 2.
230. Филиппов. Переходные режимы асинхронного двигателя в приводах с электромагнитной фрикционной муфтой (Диссертация. Томский Индустриальный институт, 1939).
231. Соколов. Электроавтоматическое копирование на станках с применением системы Леонарда, А. и Т., 1937, № 3.
232. Schmid und Kehler. Kopierfräsmaschinen mit AEG Fühlersteuerungen. AEG Mitt., 1937, № 11, 1938, № 3, 1939, № 3.
233. Вихман. Фотозлектронная автоматика в станкостроении, А. и Т., 1937, № 1.
234. Булгаков. Автоматическое управление нажимными устройствами прокатных станков, В. Э., 1936, № 1 и 2.
235. Файнберг. Новое в электрификации нажимных устройств, В. Э., 1939, № 7.
236. Александров и Маринченко. Автоматизированный блуминг (Доклад на совещании ВНИТО. Э., Харьков, 1938).
237. Попов и Зимин. Полная автоматизация процесса прокатки на реверсивном стане, А. и Т., 1936, № 4.
238. Сандлер. Об электрическом фиксированном останове, В. Э., 1940, № 10 и 1941, № 2.

Глава IX

239. Меклер. Современные приводы бумагоделательных машин (Доклад на конференция по электроприводу ВНИТО., Э, Ленинград, 1939):
240. Пресс. Системы регулирования скорости и привода металлорежущих станков (доклад там же).

Глава X

241. Сандлер. Методика расчета однофазного пускового сопротивления в цепи статора короткозамкнутых двигателей, В. Э., 1938, № 11.
242. Матюхин. Пуск синхронных двигателей с приключенным возбудителем, В. Э., 1937, № 1.
243. Гольдман. Пуск синхронных двигателей от общего пускового устройства, В. Э., 1939, № 9.
244. Эпштейн. Системы ХЭМЗ для управления синхронными двигателями, В. Э. 1940, № 3.
245. Нейман и Черкасова. Синхронные двигатели завода „Электросила“ для привода поршневых компрессоров, В. Э., 1940, № 8.
246. Шницер. Дпустимая перегрузка трансформаторов, Э., 1938, № 1 и 12.
247. Марголин. Непосредственное включение в сеть синхронных и асинхронных короткозамкнутых двигателей (Доклад на конференции по электроприводу, ВНИТОЭ., Ленинград, 1939).

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматизированный привод 25
 Автостоп 490
 Аглицкий 227
 Агрегат производственный электрифицированный 27
 Амплидин 583
 Амслера интегратор 72
 Аппаратура управления 31
 Арнольд 184
 Аронов 184, 304
 Асинхронный момент 229
 Астатическое регулирование 587, 583
 Банкаброш 16
 Бегишев 3
 Бланка управление 252
 Булгаков 404
 Бумагоделательной машины привод 21
 Бушуро 609
 Вал электрический 542
 Ватеры кольцевые 16
 Вейлер (о маховых массах) 522
 Вейлера схема 196
 Винтер-Эйхберга двигатель 235
 Вихман 591
 Включений число 102
 Вольт на оборот 185
 Время остановки 80
 — пуска 80
 — работы при переменной нагрузке t_1 80
 — торможения 80
 Габариты двигателя 33
 Гейланда каскад 519
 Гейлер 273, 293, 418
 Глубокий паз 201
 Голован 413
 ГОСТ 183-41 35
 ГОЭЛРО план 25
 Губенко 337
 Гурвица критерий 256
 Гутмана-Латура двигатель 231
 Давидсона метод 229
 Давидсона экипаж 12
 Д'Аламбера принцип 107
 Даландера схема 499
 Даниельсона двигатель 605
 Датчик 552
 Дери двигатель 231
 Дженни муфта 591
 Диаграмма нагрузочная 62, 218
 Динамическое торможение 169, 282
 Динамо 26
 Дифференциалы трехфазные 574
 Длительность цикла 80
 Доливо-Добро ольский 12
 Дранников 3
 Дуговой статор 507
 Жесткости степень (α %) 157
 Игнитрон 483
 Изоляции классы 35
 Ильгнера система 299
 Ирошников 376
 Назанцев 131, 132
 Кардана формула 385
 Каскадные схемы 512
 Касьянов 218, 412
 Каялов 419
 Квадратичная система Леонарда 453
 Кельвина метод 387
 Кепе шкив 304
 Кильбури и Ферри 426
 Кинетическая энергия 107
 Кирхгофа законы 175
 Клосса уравнения 203
 Козичека каскад 519
 Копытов 544
 Корндорфера схема 623
 Костенко 422

- Коэффициент устойчивости 257
 — ухудшения охлаждения 74, 81
 Коэффициент форсировки (α) 463
 Кратность тока короткого замыкания 616
 Кремера каскад 519
 Кремера машина 455
 Крупногрупповой провод 13
 Кулицкий 74, 80
 Лагранжа уравнения 107
 Ленин 25
 Ленц 12
 Леонарда-Ильгнер система 450
 Леонарда система 466
 — — квадратичная 453
 — — с трехмоточным генератором 464
 Линия метод 229
 Линеиная нагрузка 40
 Линке 348
 Люк 44
 Маркса вентиль 483
 Матюхин 430
 Маховика выбор 295
 Машинная постоянная 48
 Мерпля метод 192
 Многодвигательный привод 18
 Многостаночное обслуживание 11
 Момент асинхронный 229
 — двигателя 108
 — динамический 108
 — инерции 107
 — маховой 117
 — номинальный 40
 — опрокидывающий 202
 — относительный 162
 — перегрузочный 40, 615
 — подсинхронный 615, 617
 — потенциальный 109
 — пусковой 609, 611
 — реактивный 109, 229
 — синхронный 229
 — статический 108
 — эквивалентный 75
 — электромагнитный 161
 Морозов 463
 Мотороль 492
 Мощность динамическая 112
 — длительная 34
 — кратковременная 34
 — мгновенная 34
 — номинальная 34
 — опрокидывающая 202
 — перегрузочная 34
 — средняя 63
 — статическая 112
 — эквивалентная 78
 Мощность изменения (по нагреву) 39
 Муфта гидравлическая 136, 591
 — электромагнитная 136, 590
 Нагрева теория двухступенчатая 45
 — — , дифференциальное уравнение 45
 — — многоступенчатая 44
 — — одноступенчатая 45
 Нагрузочная диаграмма 62, 218
 — — фиктивная 291
 Найквиста критерии 256
 Натаниса схема 196
 Negro дель Сальвадор 12
 Номинальная скорость 441
 Нориевский 3
 Нормальное сопротивление 159
 Одиночный привод 13
 Одноступенчатая теория нагрева 49
 Опрокидывающая мощность 202
 — — электромеханическая постоянная 397
 Опрокидывающее скольжение 202
 Опрокидывающий момент 202
 Орлов 281
 Осноса двигатель 605
 ОСТ 7341 203
 Охлаждения ухудшения коэффициент 74, 81
 Перегрузка по нагреву 39
 Перегрузочная способность 40
 Передаточное число (наиболее выгодное для пуска) 153
 Передача механическая 29
 Повышенная производительность предприятия 16
 Ползукая скорость 180
 Поперечный возбудитель 454
 Постоянная времени нагрева (тепловой инерции) 47, 49, 261
 — — машинная 48
 — — пуска 284
 — — электромагнитной инерции 261
 — — электромеханическая электропривода 261
 Потери средние 81
 Пресс 131
 Приведение маховых масс 115
 — — статических моментов 113
 Привод (определение) 13—19, 26
 — автоматизированный и неавтоматизированный 27
 — — следящий 538
 — — трансмиссионный 11
 Приемник 552

Принцип пропорций 322
 Продолжительность включения нормальная 86
 — относительная 86, 90, 96
 Продольная и поперечная реактивность 230
 Противовключенный режим 167, 277
 Процент скольжения 210
 — сопротивления 210
 Прядильной машины провод 21
 Путь в оборотах 335, 144
 Радиус инерции 116
 Реактивная э. д. с. 40
 Реактивность продольная и поперечная 230
 Реактивный двигатель 574
 Регулекс 462
 Регулирование астатическое и статическое 578—583
 — скорости 432
 Регулятор жидкостный 299
 — контакторный 302
 — Тирилля 572
 — угольный 573, 576, 586
 Редукторный двигатель 638
 Режим работы 58—59
 Рекуперативное торможение 166
 Репульсионный двигатель 231
 Рихтера-Шраге двигатель 231
 Рогулочные вагера 21
 Розенберга машина 583
 Ролик-двигатель 22
 Рольганг 19, 22
 Рототроль 449, 462
 Рюденберг 396
 Савинков 338
 Садовский 557
 Самоиндукции коэффициент 353
 Самосины (сельсины) 551, 576, 592
 Сельфакторы шерстяные 16
 Сергеев 544
 Серия нормальная и специализированная 34
 Симпатическое управление 589
 Синхронизированный двигатель 631
 Синхронный момент 229
 Скольжение номинальное 201
 — опрокидывающее 202
 — , процент 210
 — , регулятор 502
 Скорости колебания 16
 — регулирования 432
 Скорость ползучая 180
 Следящий привод 588
 Соколов 463
 Сопротивление динамического торможения 173

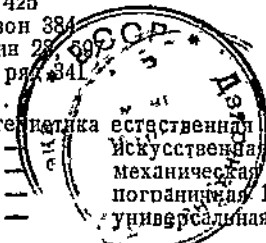
Сопротивление нормальное 159
 — относительное 160
 — полное 160
 — противовключения 173
 — процентное 160
 Сортовых станок привод 20
 Стандартизация двигателей 23
 Статическая мощность 112
 Статический момент 108
 Статическое регулирование 578, 583
 Стахановское движение 114
 Стефана-Больмана закон 45
 Стефанович 363
 Степень регулирования скорости 434

Таймотроль 492
 Температуры превышение 48
 Теплоемкость машины 45
 Теплоотдача 45
 Теплоотдача машины 45
 Теплоотбойность 35
 Тиратроны 483
 Ток номинальный 40
 — перегрузочный 40
 — эквивалентный 70, 74
 Торможение динамическое 169, 182
 — противовключения 167, 229
 — рекуперативное 167
 Трансмиссионный привод 13
 Третин 386
 Тромбетта 505

Уайтинга возбудитель 454
 Удельный вращающий момент переменных потерь 132
 Управление электроприводами 260
 Уравнение движения привода 108
 Условия устойчивости 257
 Устойчивости коэффициент 257
 Ухудшения охлаждения коэффициент 74, 81

Фазорегулятор 489
 Фатеев 3
 Ферри 426
 Фиша двигатель 605
 Фланцевый двигатель 17
 Форсировка возбуждения 460
 Форсировки коэффициент 463
 Франк 425
 Фрейдзон 384
 Фридкин 23
 Фурье ряд 341

Характеристика естественная 165
 — искусственная 165
 — механическая 157
 — пограничная 184
 — универсальная 198



- Хиббарда метод 616
 Хивисайд 384
 ХЭМЗ 26
- Ц**
 Целиков 376
 Цикла длительность 80
- Ч**
 Число включений 102
- Ш**
 Шаблон экспоненциальной кривой 56
 Шевалие 44
 Шенфер КИ 546
 Шербиуса каскад 519, 226
 — машина 526
 Шибелер 100, 104
 Шляпошников 491
 Шрагз-Рихтера двигатель 510, 565, 578
 Шуенко 04
 Шюлер, двигатель 605
- Э**
 Эджертона и Фура формула 42)
- Эдисон 12
 Эйлера метод 388
 Эквивалентная емкость 363
 — мощность 78
 — схема 201
 Эквивалентное сопротивление 160
 Эквивалентный момент 75
 — ток 70, 74
 Экспоненциальная кривая 46
 Эл. трифазированная машина 22
 Электрический вал 542
 Электромагнитная постоянная 261
 Электромеханическая постоянная
 электропривода 261
 Электропривод 26
 Электропривод автоматизированный
 и неавтоматизированный 27
 Электросила 26
 Эфрос 348
- Я**
 Якоби 12

Редактор *Н. В. Горохов*

Технический редактор *И. М. Скорцов*

Сдано в пр-во 13.II 1945 г.

Подписано к печати 23.VIII 1945 г.

Объем 42 печ. л., 50 уч.-авт. л.

Тираж 15000

Формат бумаги 60/92 1/16

Цена 27 р.

A20290

Тип. знак. в 1 печ. л. 52800

Заказ 49.