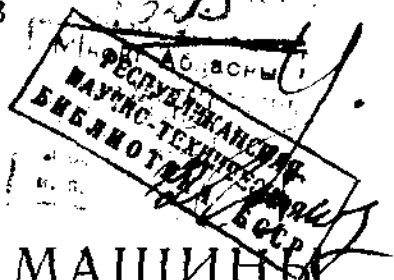


621.313
В 19

Д. В. ВАСИЛЬЕВ

621.313
В 19

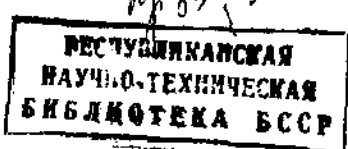


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ В СХЕМАХ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ

Д Е П



46021



ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО НКТП СССР
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД • 1935 • МОСКВА

389 678

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Нет нужды доказывать громадное значение автоматизации в современной технике. Промышленные и иные установки, автоматически управляемые и контролируемые, дают возможность наилучшей эксплуатации агрегатов, машин, приборов и пр. при наивысших технических показателях.

Быстрейшее освоение и распространение всякого рода автоматических схем и систем управления на расстоянии (синхронная связь, передача) являются, таким образом, одной из насущных задач технической реконструкции.

Важнейшим элементом таких схем должны быть самые разнообразные виды систем синхронной передачи.

Предлагаемая работа является, как известно автору, первой попыткой дать теорию основного элемента большинства систем синхронной и автоматической связи — электрической машины, применяемой в указанных схемах.

Помещаемый в книге материал в основном представляет собой теоретическую часть лекций, читанных автором в Военно-электротехнической академии РККА им. Буденного в 1932—33 гг., для которой указанный материал и предназначался в качестве учебного пособия.

Однако все растущий интерес к проблемам автоматизации и управления на расстоянии (в самом широком смысле) со стороны практических работников промышленности побудил автора в значительной мере расширить ряд вопросов синхронной связи, причем автор использовал в своем изложении те последние материалы, которые к началу 1934 г. были приведены в советской и иностранной технической и патентной литературе.

Рассмотрение и теоретическая разработка машин как постоянного, так и, главным образом, переменного тока ведутся на основе общей теории машин. Автор считает, что именно анализ своеобразных режимов машин в системах синхронной связи наилучшим образом характеризует обобщенную теорию электрических машин и позволяет свести ее принципы к минимальному числу.

Большую пользу лицам, желающим углубленно изучить основы обобщенной теории, должна принести универсальная схема, практически осуществленная по идее автора в лаборатории электрических машин ВЭТА и дающая возможность получить любой режим бесколлекторной машины переменного тока при помощи двух асинхронных машин.

Книга, таким образом, предназначена как для практического применения, так и для студентов старших курсов соответствующих специализаций ВТУЗов.

Подробному рассмотрению аппаратуры и деталей систем синхронной связи автор предполагает посвятить другие свои работы, тем более, что такое выделение ряда вопросов отнюдь не противоречит принципу создания в дальнейшем единого стройного целого — курса автоматики.

В заключение автор выражает свою признательность начальнику кафедры Академии проф. В. К. Попову за указания, сделанные при просмотре материалов, предназначенных к изданию.

Автор приносит также благодарность инж. И. Г. Белогурову, В. И. Рыбалка и О. С. Щайкиной, оказавшим автору помощь в работе над книгой.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Стр.

Глава I. Система синхронной связи и место, занимаемое в ней электрическими машинами	9
1. Определение понятия синхронная связь (9). — 2. Элементы системы синхронной связи (9). — 3. Место, занимаемое электрическими машинами в системе синхронной связи (10).	
Глава II. Требования, предъявляемые к электрическим машинам в системе синхронной связи	11
4. Синхронный поворот (11). — 5. Синхронное вращение (11). — 6. Требования, предъявляемые к схемам синхронного поворота (12). — 7. Точность передачи (12). — 8. Мощность передачи (13). — 9. Скорость передачи (13). — 10. Устойчивость положения осей при покое системы (14). — 11. Простота согласования осей (14). — 12. Нечувствительность всей системы в целом к выпадению из синхронизма одного из принимающих приборов (14). — 13. Требования, предъявляемые к схемам синхронного вращения (15).	
Глава III. Общая классификация электрических генераторов, преобразователей и двигателей, нашедших применение в схемах синхронной связи	16
14. Схемы с коллекторными машинами для получения переменной частоты и синхронными двигателями в качестве принимающих приборов (16). — 15. Схемы с индукционными машинами на переменном токе неизменной частоты (16).	

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ.

Электрические машины в схемах с меняющейся частотой и синхронными двигателями.

A. Источники переменного тока переменной частоты.

Глава IV. Простейший источник переменной частоты — ключ-коллектор-переключатель	17
16. Принцип работы схемы с меняющейся частотой (17). — 17. Классификация источников переменного тока переменной частоты (18). — 18. Основные положения (18). — 19. Магнитодвижущие силы обмотки статора вращаемого синхронного двигателя (25). — 20. Искрение на коллекторе (29).	
Глава V. Коллектор-ключ системы Маругина	30
21. Устройство ключа (30). — 22. Кривая напряжения (31). — 23. Кривые тока в приемнике и реостате (31). — 24. Мощность ключа системы Маругина (38).	

Глава VI. Коллектор-ключ системы Барбье-Бенара	38
25. Устройство ключа-преобразователя (38). — 26. Форма кривой напряжения при однофазном токе (39). — 27. Форма кривой напряжения при трехфазном токе (40). — 28. Применение преобразователя (41). — 29. Преобразователь с кривой напряжения, весьма близкой к синусоиде (41).	
Глава VII. Источники переменной частоты по типу машин постоянного тока	42
30. Принцип действия (42). — 31. Основные соотношения при синусоидальном поле (43). — 32. Потенциальная кривая коллектора при несинусоидальном поле (46). — 33. Соотношение между первичной и вторичной электродвижущими силами (47). — 34. Коммутация (48).	
Глава VIII. Источники переменной частоты по типу одноякорных преобразователей	48
I. Источники переменной частоты с вращающимися щетками	48
35. Вводные замечания (48). — 36. Одноякорный преобразователь переменного тока в переменный другой частоты (48). — 37. Одноякорный преобразователь постоянного тока в переменный с вращающимся коллектором (54). — 38. Одноякорный преобразователь постоянного тока в переменный с неподвижным коллектором (56).	
II. Источники переменной частоты с неподвижными щетками	58
39. Источники переменной частоты по типу одноякорного преобразователя переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты (58). — 40. Источник переменного тока переменной частоты по типу одноякорного преобразователя с двумя обмотками на якоре (62).	
Глава IX. Общий случай коллектора как преобразователя частоты	62
41. Сопоставление различных типов преобразователей (62). — 42. Преобразователь частоты с вращающимся полем на статоре (63). — 43. Преобразователь с возбуждением с ротора (65). — 44. Сводка основных соотношений в различных преобразователях с коллектором (67).	
Глава X. Коллекторные генераторы переменного тока переменной частоты при постоянном числе оборотов в минуту	67
45. Общие положения (67). — 46. Общая схема установки с коллекторным генератором (68). — 47. Основные типы коллекторных генераторов (71).	
Глава XI. Коллекторный генератор с неявновыраженными полюсами	72
I. Типы и основные соотношения	72
48. Общие сведения о коллекторном генераторе с неявновыраженными полюсами (72). — 49. Возбуждение со статора. Схема (73). — 50. Основные соотношения в коллекторном генераторе (75). — 51. Генератор с неполной компенсацией (83). — 52. Возбуждение с ротора (84). — 53. Генератор с возбуждением с ротора при одной обмотке на последнем (88). — 54. Генератор с возбуждением со статора с комбинированной обмоткой на статоре (89). — 55. Графическое изображение зависимости между электродвижущими силами генератора с возбуждением с ротора (89).	
II. Различные режимы работы коллекторного генератора	92
56. Общие замечания (92). — 57. Случай I. Работа двигателя при постоянном моменте на валу (94). — 58. Учет падения напряжения в обмотке возбуждения коллекторного генератора (96). — 59. Случай II. Работа двигателя при моменте на валу, обратно пропорциональном числу оборотов (97). — 60. Случай III. Работа двигателя при моменте на валу пропорциональном квадрату числа оборотов (98). — 61. Выбор возбуждения и работа его при различных режимах работы коллекторного генератора (100).	
III. Мощность возбуждения коллекторного генератора	102
62. Роль компенсирующей обмотки W_s (102). — 63. Реактивная мощность возбуждения при возбуждении со статора (106). — 64. Реактивная	

мощность возбуждения при возбуждении с ротора (107). — 65. Сопоставление данных обоих типов возбуждения (110). — 66. Система возбуждения с двумя возбудителями (111).	
IV. Обмотки и коммутация коллекторного генератора	113
67. Коммутация коллекторных машин переменного тока (113). — 68. Электродвижущие силы короткозамкнутых секций (114). — 69. Главные обмотки коллекторного генератора с неявновыраженными полюсами (117). — 70. Обмотки добавочных полюсов (120).	
Глава XII. Коллекторный генератор с явновыраженными полюсами	124
71. Общие данные (124). — 72. Электродвижущие силы коллекторного генератора Шербиуса (126). — 73. Коммутация в генераторе Шербиуса (127). — 74. Главные обмотки машины Шербиуса (129). — 75. Обмотки добавочных полюсов в машине Шербиуса (133). — 76. Обмотки коллекторного генератора с шестью явновыраженными полюсами на двойное полюсное деление (134).	
Глава XIII. Коллекторные генераторы переменной частоты. (Дополнительные сведения)	136
77. Компенсирующая и коммутирующая обмотка проф. М. П. Костенко (136). — 78. Система фирмы Вайккерс (139). — 79. Сравнение коллекторных генераторов с явно- и неявновыраженными полюсами (140). — 80. Различные применения коллекторного генератора (141).	
Глава XIV. Источники переменной частоты с применением генератора по типу бесколлекторной асинхронной машины	142
81. Общие замечания (142). — 82. Схема проф. М. П. Костенко (142). — 83. Схема фирмы Сименс-Шуккерт (147). — 84. Вторая схема с преобразователем частоты (148).	
Глава XV. Системы с механическими и электрическими дифференциалами	
85. Вводные замечания (149). — 86. Механический дифференциал (149). — 87. Система с дифференциалом (150). — 88. Другие применения механического дифференциала в схемах с источниками переменной частоты (151). — 89. Механический дифференциал в схеме с коллекторным источником переменной частоты и синхронными двигателями (152). — 90. Электрический дифференциал (155).	
V. Различные типы синхронных двигателей в системе синхронной связи с переменной частотой.	
Глава XVI. Основные представления о работе синхронных двигателей	153
91. Введение (158). — 92. Физическая картина работы синхронного двигателя в системе синхронной связи (159). 93. Кривые вращающих и статических моментов синхронных двигателей (162). — 94. Практическое определение кривой вращающих моментов (166). — 95. Общее выражение для вращающего момента (167).	
Глава XVII. Синхронный двигатель с возбуждением постоянным током	165
96. Работа синхронного двигателя с возбуждением постоянным током (168). — 97. Выражения для мощности синхронного двигателя с неявновыраженными полюсами (170). — 98. Вращающий момент синхронного двигателя с неявновыраженными полюсами (173). — 99. Синхронизирующая мощность и синхронизирующий момент синхронного двигателя (175). — 100. Диаграмма напряжений синхронного двигателя с явновыраженными полюсами (178). — 101. Выражения для мощностей синхронного двигателя с явновыраженными полюсами (180).	
Глава XVIII. Синхронные двигатели без возбуждения на роторе	184
102. Общие положения (184). — 103. Синхронный реактивный двигатель (185). — 104. Принцип работы трехфазной реактивной машины (186). — 105. Картина распределения магнитного потока в реактивном двигателе (187). — 106. Общее выражение для статического момента реактивного двигателя (191). — 107. Процесс в электрической	

цепи реактивной машины (193). — 108. Диаграммы напряжения реактивной машины (198). — 109. Выражения для мощности и момента реактивной машины (199). — 110. Область применения трехфазного реактивного двигателя (205). — 111. Особенности работы однофазного реактивного двигателя (205). — 112. Влияние на вращающий момент некоторых размеров реактивной машины (209). — 113. Колесо Лакура (211).

Глава XIX. Различные типы синхронных двигателей с эластичной связью с осью

211

114. Введение (211). — 115. Двигатель фирмы Сперри (212). — 116. Реактивный двигатель с крестообразным ротором (213). — 117. Реактивный двигатель с цилиндрическим ротором (215). — 118. Двигатель системы Вихерса (215). — 119. Синхронный двигатель в японской системе синхронной связи (216). — 120. Двигатель с гистерезисным моментом (218). — 121. Синхронный двигатель с возбуждением от сети переменного тока через выпрямитель (222). — 122. Двигатель двойного питания в синхронном режиме (223). — 123. Синхронный двигатель-редуктор скорости (223). — 124. Реактивный двигатель по типу индукционных двигателей для работы от сети с неизменной частотой (226).

Глава XX. Работа синхронных двигателей при меняющейся частоте

228

125. Введение (228). — 126. Работа двигателя с возбуждением постоянным током (230). — 127. Работа реактивного двигателя с вращающимся полем от сети с переменной частотой (236). — 128. Работа синхронного двигателя с явновыраженными полюсами на статоре от сети с переменной частотой (237).

Глава XXI. Синхронные двигатели с жесткой связью с осью

129. Введение (243). — 130. Двигатели в системе Гейслера (243). — 131. Двигатели в системе Эриксона (245).

ЧАСТЬ ВТОРАЯ.

Индукционные машины и режимы работы их в схемах синхронной связи.

A. Индукционная машина двойного питания.

Глава XXII. Синхронные режимы машины двойного питания

249

132. Введение (249). — 133. Общие сведения о машине двойного питания (250). — 134. Схемы включения и принцип действия (251). — 135. Машина двойного питания от одной сети при вращении полей в разные стороны (255). — 136. Машина двойного питания от двух сетей при вращении полей в разные стороны (261). — 137. Выражения для общего случая машины двойного питания (264). — 138. Машина двойного питания от одной сети при вращении полей в одну сторону (267). — 139. Машина двойного питания от двух сетей с разными частотами и при вращении полей в одну сторону (279). — 140. Вывод основных выражений для машин двойного питания (288). — 141. Примеры применения двигателя двойного питания с вращением полей в одну сторону (290).

Глава XXIII. Асинхронные режимы машины двойного питания

292

142. Введение (292). — 143. Асинхронный режим при вращении полей в разные стороны (293). — 144. Асинхронный режим при вращении полей в одну сторону (297).

B. Индукционные машины в схемах синхронной связи с неизменной частотой.

Глава XXIV. Индукционные машины в схемах на трехфазном токе

299

145. Введение (299). — 146. Принцип действия (300). — 147. Диаграммы системы синхронной связи с индукционными машинами при скорости вращения близкой к нулю (305). — 148. Нарушения синхронного режима

работы системы (308). — 149. Диаграммы системы синхронной связи с индукционными машинами при скорости вращения, отличной от нуля (311). — 150. Кривые моментов системы синхронной связи с индукционными машинами при скорости вращения, отличной от нуля (316). — 151. Отдельные схемы и примеры применения систем синхронной связи с трехфазными индукционными машинами (322).

- Глава XXV.** Индукционные машины в схемах синхронной связи на однофазном токе неизменной частоты. 325
152. Общие данные (325). — 153. Соотношение эдс и токов системы на однофазном токе (327). — 154. Выражения для определения токов системы в зависимости от угла θ (332). — 155. Случай работы системы при синхронной скорости (334). — 156. Случай работы системы при любой скорости и отсутствии активных сопротивлений (335). — 157. Случай работы системы при любой скорости и учете активных сопротивлений (336). — 158. Основные выражения для вращающего момента (340). — 159. Кривые моментов системы при скорости, близкой к нулю (344). — 160. Кривые моментов системы при скорости, отличной от нуля (344). — 161. Соотношение между мощностями передатчика и приемника и коэффициент полезного действия (347). — 162. Случай нескольких приемников, работающих от одного передатчика (349).
- Глава XXVI.** Применение и эксплуатация систем на однофазном переменном токе с индукционными машинами. 354
163. Введение (354). — 164. Передача указаний (355). — 165. Передача для управления рабочими деталями (355). — 166. Работа системы с селективным действием (357). — 167. Дифференциальная синхронная передача (357). — 168. Влияние сопротивлений соединительной линии (358). — 169. Использование земли в качестве соединительного провода (359). — 170. Использование телефонного кабеля для соединений (359). — 171. Влияние линий сильного тока (360). — 172. Пример применения дифференциальной системы синхронной связи на однофазном токе (360). — 173. Сравнение трехфазной и однофазной систем синхронной связи (362).

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ.

Схемы для поддержания синхронного вращения двигателей без механической связи между ними.

- Глава XXVII.** Схемы со вспомогательными машинами для поддержания синхронного вращения двигателей. 364
174. Введение (364). — 175. Схема с синхронными машинами (365). — 176. Схема с индукционными машинами (366). — 177. Практическая схема с вспомогательными индукционными машинами (374). — 178. Пример применения схемы со вспомогательными индукционными машинами (375).
- Глава XXVIII.** Схемы для поддержания синхронного вращения двигателей с электрически связанными обмотками. 376
179. Введение (376). — 180. Схема для синхронного вращения асинхронных двигателей со вспомогательными обмотками (376). — 181. Схемы для синхронного вращения асинхронных двигателей с реостатом в цепи роторов (379). — 182. Схемы для получения синхронного вращения машин постоянного тока (382). — 183. Схема для синхронного вращения двигателей с улучшенной коммутацией (384). — 184. Сравнение величины углов смещения осей при электрическом и механическом их соединении (385).
- Приложение.* Универсальная схема для лабораторных исследований и демонстрации различных режимов работы бесколлекторных машин переменного тока. 387
- ГЛАВНЕЙШАЯ ЛИТЕРАТУРА** 396

ГЛАВА I.

СИСТЕМА СИНХРОННОЙ СВЯЗИ И МЕСТО, ЗАНИМАЕМОЕ В НЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МАШИНАМИ.

1. Определение понятия синхронная связь. Под системой синхронной связи следует понимать совокупность устройств, служащих для более или менее точной передачи на расстояние тех или иных перемещений (угловых или линейных), а также для поддержания синхронности вращения двух или нескольких осей. Системы синхронной связи могут служить самым разнообразным целям.

Из этих целей следует указать: 1) сигнализацию, 2) контроль за протеканием какого-либо процесса, 3) измерения на расстоянии, 4) передачу приказаний, нашедшую себе применение как в гражданских (диспетчерские посты центральных электрических станций), так и в военных установках (артиллерийские, прожекторные и тому подобные установки), 5) автоматическое управление (в гражданской технике — управление работой машинорудий в промышленных предприятиях, работой электрических станций и т. п., в военной технике — управление артустановками, движущимися механизмами), 6) автоматическое регулирование, например поддержание какого-либо режима неизменным при меняющихся условиях работы (регулирование напряжения или тока генератора, скорости вращения механизма, поддержание синхронности вращения нескольких электрических двигателей, механически между собой не связанных, и т. п.).

Система синхронной связи может иметь проводное или беспроводное выполнение. Последнее выполнение особенно существенно при управлении движущимися механизмами (самолетами, автомобилями, судами и т. п.), равно как и отдельными устройствами, на них расположенными.

Однако синхронная связь по радио в настоящее время находит широкое применение и в стационарных установках (железные дороги, станции, укрепленные пункты и т. п.).

2. Элементы системы синхронной связи. Вне зависимости от рода выполнения (проводное или беспроводное) система синхронной связи в общем случае имеет в себе следующие основные части: 1) командное (ведущее) устройство, 2) линия передачи, 3) управляемое (ведомое) устройство или ряд параллельно включенных ведомых устройств. Каждая из указанных частей может включать в себя в общем случае большое количество отдельных элементов, опускаемых в ряде частных, более простых схем. Основным элементом командного устройства является ключ, связываемый, в случае передачи малых мощностей на небольшое расстояние, непосредственно с линией передачи, при больших мощностях — с управляемым им передатчи-

ком. Между последним и ключом может быть также включен ряд реле, усилителей и т. п. Управление ключом осуществляется самыми разнообразными способами, зависящими от характера операций, необходимых для передачи на расстояние, и отдельных индикаторов, сопровождающих данный производственный или другой процесс.

На ключ можно воздействовать механически, электрически (изменением электрических параметров цепи), изменением цвета, звука, света и т. п. Конечно, тип ключа и его конструкция, в зависимости от способа воздействия на него, оказываются самыми разнообразными. Так, например, для механических и электрических перемещений ключом может служить электрическая машина, электрических — тиратрон, световых — фотоэлемент, звуковых — акустическое устройство с цепью реле, и т. п.

Линия передачи в простейшем случае представляет собой несколько проводников, связывающих командное и управляемое устройства. Вообще же она может включать в себя реле различного рода, усилительные устройства и т. п. В случае беспроводной связи в линию передачи входят антенные устройства ведущей и ведомой частей системы синхронной связи или элементы акустической и оптической передачи.

Управляемое устройство состоит из приемника, производящего под воздействием командного устройства соответственные синхронные перемещения (механические, электрические, световые, звуковые), управляющие исполнительным механизмом (человеком, рабочим орудием, вентилем и т. п.) или непосредственно, или же через ряд промежуточных звеньев — механических, электрических или электромеханических усилителей (реле, электронные лампы, серводвигатели, гидравлические передачи, следящий привод и т. п.).

3. Место, занимаемое электрическими машинами в системе синхронной связи. Система синхронной связи может быть выполнена или как чисто релейная схема, осуществляемая при помощи различных комбинаций отдельных реле того или иного типа, в частности в соединении с селекторами,¹ или же как схема с электрическими машинами в качестве управляющего и управляемого устройств, или же, наконец, по типу смешанной схемы, выполненной как сочетание реле и электрических машин. Последний тип получил наибольшее распространение, так как он позволяет повысить точность синхронной связи за счет управления при помощи малых мощностей большими установками нормального энергетического хозяйства. Электрическая машина может быть применена в качестве основного элемента управляющего устройства, т. е. в качестве ключа, непосредственно связанного с линией передачи или управляющего другой электрической машиной большей мощности — передатчиком. Такая машина может работать или в качестве генератора электрической энергии или в качестве преобразователя одного рода тока в другой (преобразователя постоянного тока в переменный, преобразователя частоты и т. п.).

В управляемом устройстве системы синхронной связи электрическая машина выполняет функции двигателя, воспроизводя заданные ей синхронные перемещения (отрабатывание угла или определенного времени). В точной системе синхронной связи указанная машина, обычно малой мощности, служит для включения и выключения цепи серводвигателя или приводного двигателя или же поворота деталей следящей системы на предмет выполнения соответствующих заданным синхронным перемещениям действий.

¹ Селектором называется прибор, избирательно устанавливающий связь командного поста с определенным, выбранным на последнем, приемником.

Таким образом в управляемой части системы электрическая машина применяется и в качестве органа, непосредственно воспроизводящего перемещения на командном посту (приемника), и в качестве двигателей (серводвигателей) для управления приводными машинами, в числе которых также могут быть применены электрические двигатели.

Кроме того, в управляющем (командном) устройстве должен быть установлен контрольный двигатель такого же типа, как и двигатель на ведомом посту, что необходимо в целях контроля правильности выполнения задаваемых перемещений и систематической проверки исправности работы схемы. Ключ в управляющем устройстве может приводиться в движение или от руки или при помощи вводимого в работу на определенный промежуток времени серводвигателя, в частности—электрического двигателя.

Содержание настоящей книги обнимает рассмотрение тех электрических машин и режимов работы их, которые применяются и используются в качестве ключа, передатчика и приемника. Серводвигателям и следящему приводу автор предполагает посвящать специальную работу.

ГЛАВА II.

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ В СИСТЕМЕ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ.

Требования, которые должны быть предъявлены к электрическим машинам в системах синхронной связи, зависят от типа самой системы и ее назначения.

Синхронная связь может быть осуществляема, как известно, для двоякого рода функций: 1) для передачи синхронного поворота и 2) для получения синхронного вращения двух или нескольких осей.

4. Синхронный поворот. Эти схемы служат для передачи синхронных перемещений в собственном смысле этого слова, т. е. для так называемой синхронной передачи угла, производящей перемещение ведомых осей на строго определенное число градусов (с известной, конечно, точностью).

Статическое положение системы фиксировано удерживающим ее в таком положении синхронизирующим моментом, т. е. в системе имеет место так называемый синхронизм положения (при прекращении движения в произвольный момент все оси должны остановиться в соответственно установленных положениях).

К этому типу синхронной связи собственно и относятся устройства для передачи синхронных перемещений, т. е. то, что называется синхронной передачей.

5. Синхронное вращение. Синхронная связь может быть также применена для поддержания постоянства вращения двух или нескольких осей, механически между собой не связанных. В этом случае чаще всего не играет роли строгая фиксированность положения осей при покое. Здесь существенным является синхронность вращения, равно как и сохранение синхронности при пуске и останове.

Такое синхронное вращение является существенным в целом ряде случаев электрического привода одного механизма или деталей его от двух или нескольких двигателей. Так, например, необходимость подобной синхронной связи двигателей, механически между собой не соединенных, имеет место при разведении больших мостов, когда два двигателя вращают оба конца осей

разводной части моста.¹ Очевидно, что в этом случае во избежание перекосов указанной части необходимо поддержание строго одинакового перемещения осей приводных двигателей.

Подобного рода связь между отдельными двигателями необходима также при совместной работе их по подъему одного большого груза и т. п. Синхронную связь между двигателями применяет, например, фирма Сименс и Гальске для одновременного поворота сдвоенных и стросенных рулей больших кораблей.

Кроме того, может иметь место также синхронное вращение двух или нескольких осей, когда числа их оборотов не равны, а находятся между собой в каком-либо неизменном отношении.

Следует отметить, что и при синхронном вращении, так же как и при передаче угла, оси должны при своем вращении сохранять также и синхронизм положения, т. е. занимать в пространстве каждый момент одинаковые положения (с известной, конечно, точностью). Однако требования, которые должны быть предъявлены к схеме и двигателям, в обоих случаях (в отношении точности) различны. При передаче синхронного поворота синхронизм положения должен быть выдержан значительно строже, чем во втором случае.

Очевидно, что схема синхронной передачи угла может быть использована и для непрерывного вращении осей (синхронного вращении). Подобное применение имеет место, например, в схемах синхронной связи для установок звукового кино и телевидения. Физические процессы, протекающие в обоих типах схем, имеют теснейшую связь, которая позволяет часто один тип считать частным случаем другого.

6. Требования, предъявляемые к схемам синхронного поворота. Для выяснения тех требований, которые должны быть предъявлены электрическим машинам в схемах синхронного поворота, надлежит вкратце познакомиться с требованиями, относящимися ко всей схеме в целом, хотя рассмотрение самих схем синхронного поворота и работы их не входит в задачи настоящей книги.

Как выяснится в дальнейшем, большинство требований к схемам являются требованиями и к электрическим машинам, так как последние составляют существеннейшие элементы схемы.

Указанные требования могут быть разделены на: а) технические требования в узком смысле этого слова (т. е. в отношении технического эффекта), б) эксплуатационные и в) экономические требования.

Рассмотрим прежде всего технические требования. Последние зависят в сильной степени от назначения передачи, которое в одних случаях выдвигает на первый план те требования, которые при других обстоятельствах оказываются в тени. Так, например, иногда существенным является большой вращающий момент при сравнительно небольшой точности (автоматическая подача топлива, воды и т. п.), иногда же, наоборот, высокая точность является центральным условием, а величина момента не играет роли (схемы регулирования, телеизмерения, телемеханика в военном деле). В основном требования сводятся к следующему.

7. Точность передачи. Под точностью передачи следует понимать больший или меньший синхронизм положения при полной синхронности движения осей командного и принимающих постов, т. е. степень совпадения

¹ См., например, статью Рыжикова—Электрическое оборудование разводного моста, „Вестн. Электропром.“, № 12, 1933.

положений ведомой и ведущей осей в пространстве в каждый данный момент при синхронном их ходе. Та или иная степень точности может ставить те или иные условия минимального расхождения осей на неизменный угол при неизменном моменте на валу ведомого двигателя. Такое расхождение характерно для целого ряда синхронных передач и обусловливается необходимостью получения в системе синхронизирующего момента, создаваемого именно за счет некоторого смещения осей роторов передатчика и приемников в пространстве. Степень точности передачи заставляет останавливаться при выборе на той системе, которая прежде всего удовлетворяет этому требованию, а затем и большинству последующих. Особенно жесткие условия ставит в этом отношении военная техника, частично техника звукового кино и телевидения и системы суммирования показаний измерительных приборов различного рода.

8. Мощность передачи. Наличие определенного вращающего момента на валу принимающего двигателя позволяет или непосредственно связывать его с исполнительным механизмом или заставляет вставлять промежуточные механические, электромеханические или другие усилители, присутствие которых вообще является нежелательным, так как усложняет и удорожает систему, внося дополнительные неточности в передачу.

Следовательно, весьма существенным для электрической машины в схеме синхронного поворота является наличие достаточной мощности при сохранении точности работы. Оказывается, что эти два требования находятся в противоречии между собой и часто требуют компромиссного решения, причем на сцену при этом выступает третий весьма существенный фактор — скорость передачи.

9. Скорость передачи. Это требование за последнее время становится все более актуальным в связи с расширением области применения синхронной передачи и с общим повышением скорости производственных процессов, скорости движения рабочих орудий, в частности военных механизмов, и т. п.

Повышение скорости движения повозок различного рода (самолетов, танков, судов) требует также большой быстроты срабатывания телемеханических устройств.

Старые схемы синхронной связи именно и не удовлетворяют этому условию, что вынуждает переходить к новым схемам, иногда менее точным, но дающим большую скорость передачи.

Синхронная передача, кроме того, должна быть достаточно нечувствительной к возможному повышению скорости передачи, в случае надобности, против расчетного нормального значения, что особенно важно в военных установках.

Таким образом, современные электрические машины, применяемые в схемах синхронного поворота, должны удовлетворять требованиям большой быстроходности и малой инерции (в частности серводвигатели), что диктуется динамикой привода.

Как на пример современной скорости автоматического управления большими установками со значительными передвижными массами можно указать на автоматическое управление индукционным регулятором большой мощности. Так, для поворачивания ротора последнего из одного конечного положения в другое, в зависимости от характера связи, требуется 10 ÷ 30 секунд. Очевидно, что почти все это время следует отнести за счет быстроты срабатывания самого привода, время же на срабатывание синхронной связи должно быть невозможно минимальным.

За последнее время в автоматическом управлении начинают приобретать большое значение тиратроны, быстрота действия которых вследствие отсутствия движущихся частей, а следовательно инерции их, отвечает современным требованиям скорости передачи. В схемах синхронной связи тиратроны, служащие для управления приводным двигателем или серводвигателем, приводятся в действие от весьма чувствительной синхронной передачи в широком смысле этого слова (чисто релейная передача ионными и другими реле, передача электрическими машинами и т. п.).

10. Устойчивость положения осей при покое системы. Это обстоятельство выдвигается в связи с тем, что и в положении покоя ведущая и ведомая оси должны остаться во взаимно неизменных положениях (статический синхронизм положений). Иначе согласованность работы элементов системы нарушится и при работе все оси начнут двигаться от различных исходных точек. Кроме того необходимо, чтобы при случайных механических воздействиях на установку и резких изменениях скорости передачи оси не приходили в маятникообразное колебательное движение, могущее вызвать ненужные манипуляции исполнительного механизма. Указанные условия, как будет видно далее, в значительной степени влияют на выбор характеристик электрической машины как командного, так и приемного устройства.

11. Простота согласования осей. В случае, если предыдущее условие не выполняется достаточно жестко, в частности при отключениях и переключениях системы, возникает вопрос о наиболее простом и быстром выполнении согласования положения осей. Такое же условие важно при включении нового приемного устройства, ремонте одного из двигателей и т. п.

При некоторых типах машин согласование осей может производиться автоматически при включении системы в сеть (самосинхронизирующаяся передача; самосинхронизирующиеся двигатели). В системах с другими типами двигателей приходится производить так называемое вынужденное согласование при участии человека.

Вынужденное согласование приходится производить во всех типах машин, когда передающая и принимающая оси могут поворачиваться более чем на 360 электрических градусов. В этом случае при отключении системы и отсутствии специальных стопорных устройств всегда возможно расхождение осей на полное число оборотов в электрических градусах, если даже применены и самосинхронизирующиеся электрические машины, так как последние могут автоматически синхронизироваться в пределах одного оборота в электрических градусах.

12. Нечувствительность всей системы в целом к выпадению из синхронизма одного из принимающих приборов. Как уже отмечалось, весьма часто имеет место работа нескольких принимающих (ведомых) приборов от одного командного (ведущего). Это обстоятельство выдвигает вопрос о параллельной работе нескольких принимающих приборов. Очевидно, что всякие включения в общую цель синхронной связи и выключения из нее одного из приборов не должны ни в какой мере отзываться на работе остальных принимающих. Такое требование является безусловным, причем выполнение его не встречает никаких затруднений. Сложнее обстоит вопрос с влиянием выпадения из синхронизма одного из приборов на работу остальных. Такое выпадение из синхронизма может иметь место, например, при застопоривании одной из ведомых осей вследствие каких-либо неисправностей в механической передаче.

В некоторых системах указанное влияние является неотъемлемой особенностью принципа действия примененных в них электрических машин (например, системы с индукционными машинами). Поэтому при выборе такой системы приходится считаться с возможностью применения ограниченного количества параллельно ведомых осей.

Эксплуатационные требования в общем аналогичны требованиям, предъявляемым большинству электрических установок.

Прежде всего, существенным является независимость технического эффекта, на который рассчитана установка (неизменная точность, скорость, момент и т. д.), от продолжительности ее работы. В этом отношении установки с коллекторами-ключами являются менее надежными, чем, например, установка на переменном токе с индукционными машинами.

Из других эксплуатационных требований следует указать на простоту устройства передачи и элементов, в нее входящих, в частности электрических машин, на простоту обслуживания и возможность легкой замены деталей и быстрого ремонта. Стоимость эксплуатации установки также не должна быть слишком высока.

Экономические требования сводятся к вопросу об относительной дешевизне оборудования системы синхронной связи. Электрические машины являются самыми дорогими элементами схемы и стоимость их сильно сказывается на общей стоимости установки. Поэтому выбор того или иного типа электрических машин должен сообразоваться с экономическими требованиями. Так, установки с коллекторами окажутся дороже, чем установки с индукционными машинами. Однако, в специальных случаях вопросы экономии зачастую подчиняются повышенным требованиям высокого технического эффекта к синхронной передаче, без которых последняя в данном случае вообще не может быть применена. Таким образом, выбор и оценка того или иного типа электрической машины, намечаемой к применению в схеме синхронного поворота, должны производиться под углом зрения требований, предъявляемых в данных условиях к самой схеме, и при учете технических возможностей электрической машины, рассмотрение которых будет произведено ниже.

13. Требования, предъявляемые к схемам синхронного вращения. Подобные схемы предназначаются для синхронизирования между собой двух или нескольких осей, развивающих большие рабочие моменты для непосредственного привода каких-либо машин-орудий.

В этом случае основные требования для синхронного поворота — точность, скорость и согласование осей — находятся в сочетании с требованиями, предъявляемыми к приводу.

Вопрос о скорости здесь решается так же, как и в обычных электрических двигателях, не соединенных между собой синхронной связью. Существенным становится все, что характерно для нормального электрического привода, и, кроме того, наибольшая простота и дешевизна самой синхронной связи между двигателями. Последнее требование идет часто вразрез с наиболее удачным решением относительно рентабельности привода, рассматриваемой без учета синхронной связи. Так, наиболее дешевые асинхронные двигатели, возможные к применению там, где не требуется регулирования числа оборотов, имеют недостаточно удачную в экономическом отношении схему синхронной связи. Поэтому иногда приходится решать выбор в пользу двигателей постоянного тока, имеющих более совершенную и дешевую схему синхронной связи.

ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ДВИГАТЕЛЕЙ, НАШЕДШИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СХЕМАХ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ.

Выше указывалось, что существуют две основные категории схем синхронной связи: 1) схемы для синхронного поворота и 2) схемы для синхронного вращения.

Теперь надлежит привести классификацию электрических машин, применяемых в тех и в других схемах.

Схемы синхронного поворота могут быть выполнены со следующими машинами:

14. Схемы с коллекторными машинами для получения переменной частоты и синхронными двигателями в качестве принимающих приборов. Источником управления в этой схеме являются коллекторные машины различных типов, начиная от простого коллектора-переключателя и кончая коллекторным генератором переменной частоты. Частота в схеме меняется от нуля (постоянный ток) до некоторого максимума. Сообразно частоте вращаются принимающие синхронные двигатели. Последние применяются различных типов и конструкций, в зависимости от мощности и рода передачи.

15. Схемы с индукционными машинами на переменном токе неизменной частоты. В качестве ключа и принимающих приборов в этой схеме служат индукционные машины с кольцами. Применяют как однофазные, так и трехфазные машины.

Схема синхронного вращения двух или нескольких осей может выполняться для: а) любых двигателей, б) асинхронных двигателей и в) двигателей постоянного тока. В соответствии с этим двигатели можно связать между собой электрически или же применить специальные вспомогательные машины, насаженные на вал синхронизируемых двигателей и электрически связанные между собой. Сообразно с произведенной общей классификацией далее будут рассмотрены специальные электрические машины и режимы их работы.

Более подробная классификация машин по каждому типу схем будет приведена в начале соответствующего раздела книги, посвященного указанному типу.

Кроме указанных двух основных типов схем синхронной передачи существует еще целый ряд типов схем, но выполняемых с применением не машин, а телеизмерительных приборов и электронных и ионных ламп. Из таких схем следует указать на дифференциальные системы, использующие принцип электрического моста, системы с сигнальными лампами, стробоскопические системы, потенциальные и импульсные системы (временно-импульсные и частотно-импульсные), компенсационные и системы с ионно-электронными приборами.

Почти все эти системы применяются в основном для передачи указаний и измерений на расстоянии.¹ Этих схем, как не включающих в себя электрических машин, мы здесь касаться не будем.

¹ См. книгу В. К. Попова и Д. В. Васильева — Введение в электроавтоматику, 1935 г.

А. ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПЕРЕМЕННОЙ
ЧАСТОТЫ. И в. №

ГЛАВА IV.

ПРОСТЕЙШИЙ ИСТОЧНИК ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ — КЛЮЧ-
КОЛЛЕКТОР - ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ

16. Принцип работы схемы с меняющейся частотой. Характер-
ная особенность схем этого типа заключается в наличии источника пере-
менной частоты, питающего синхронные двигатели.

Простейшая схема подобного типа изображена на рис. 1. Для питания
трехфазных синхронных двигателей 2, 3 и т. д. служит источник перемен-
ной частоты 1, соединенный со статорами (или вообще с якорями) указани-

мых двигателей трехфазной
линией 4 (для получения
вращающегося поля в ведо-
мых двигателях). Источни-
ком переменной частоты
могут служить различные
электрические машины, ко-
торые или непосредственно
сами являются ключом пе-
редачи или управляются при
помощи какого-либо ключа.

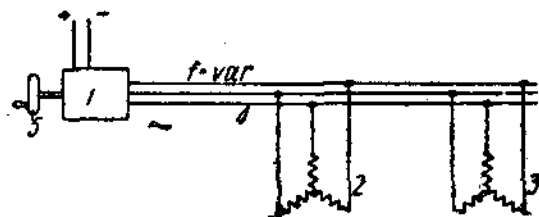


Рис. 1.

На рис. 1 имеет место простейший случай схемы, когда источник 1 пере-
менного тока переменной частоты является одновременно ключом и при-
водится в действие от-руки при помощи рукоятки 5. В данном случае
ключ 1 работает как преобразователь частоты, преобразовывая постоян-
ный ток в переменный желаемой частоты. Синхронные двигатели 2 и 3
вращаются с переменной скоростью в соответствии с частотой, создаваемой
на ключе. При положении покоя последнего частота тока в линии 4 равна
нулю, т. е. в линию поступает постоянный ток, который, обтекая об-
мотки статоров двигателей, создает неподвижное в пространстве поле,
удерживающее роторы в неизменном положении. При частоте, плавно
начинающей возрастать от нуля, поле статора начинает вращаться в про-
странстве с постепенно нарастающей скоростью, увлекая за собой ро-
торы синхронных двигателей. Принцип действия схемы остается неизмен-
ным вне зависимости от того, какие применены источники переменной
частоты и как выполнены синхронные двигатели. Один и тот же источ-

ник переменной частоты чаще всего может быть применен для управления синхронными двигателями различных типов, и наоборот — один и тот же тип двигателя может быть включен на различные источники переменной частоты.

Поэтому в дальнейшем мы сначала рассмотрим источники переменного тока переменной частоты, а потом перейдем к различным типам синхронных двигателей, применяемых в схемах синхронной связи. При рассмотрении двигателей будут одновременно приводиться и некоторые особенности источника переменной частоты, иногда приспособляемого именно к данному типу двигателя.

Следует отметить, что в некоторых схемах применяются конструкции синхронных двигателей, могущих работать лишь от ключа определенного устройства.

17. Классификация источников переменного тока переменной частоты. Источники переменного тока переменной частоты могут быть в основном разбиты на следующие типы:

- a) Простейшие источники переменной частоты — ключи-коллекторы.
- b) Коллекторы с потенциометром.
- c) Источники переменной частоты по типу машин постоянного тока.
- d) Источники переменной частоты по типу однофазных преобразователей.
- e) Коллекторный генератор Шербиуса с явно выраженными полюсами на статоре.
- f) Коллекторный генератор переменной частоты с неявно выраженными полюсами.
- g) Источники переменного тока по типу индукционной машины.
- h) Источники переменного тока по типу синхронной машины.
- i) Источники ионно-электронного типа.
- k) Источники с реле и колебательными контурами.

18. Основные положения. Наиболее простым источником переменного тока переменной частоты является двухпластинчатый коллектор-переключатель, предназначенный преобразовывать подводимый к нему постоянный ток в m -фазный переменный. На рис. 2 изображен подобный коллектор, включенный в систему синхронной передачи для управления синхронными двигателями.

Коллектор, выполненный в виде цилиндра или диска, состоит из двух токопроводящих пластин a и b , занимающих каждая обычно дугу в 150° и отделенных друг от друга вставками c , c из изолирующего материала, ширина каждой из которых обычно соответствует дуге окружности в 30° . Коллектор (вернее — коммутатор) приводится во вращение с требуемой скоростью при помощи вала d с маховичком e (ручной привод) или от специального серводвигателя с регулировкой числа оборотов от нуля (реостат в цепи якоря) или же, наконец, от какого-либо механического индикатора (например поплавка) в системе для указания уровня жидкости.

Коллектор служит для преобразования постоянного тока в переменный. На валу коллектора для подведения постоянного тока насажены два контактных кольца f , g , соединенных каждое с соответственной пластиной коллектора и снабженных щетками для подведения постоянного тока. На коллекторе установлены щетки числом равным числу фаз получаемого переменного тока. Обычно применяется трехфазная система (три щетки I, II, III, сдвинутые друг относительно друга под углом в 120°).

Щетки I, II, III соединены с линией, питающей ведомые синхронные двигатели, обмотка S статора одного из которых изображена на рис. 2.

Для рассмотрения распределения потенциала на щетках коллектора-переключателя примем за исходное положение коллектора изображенное

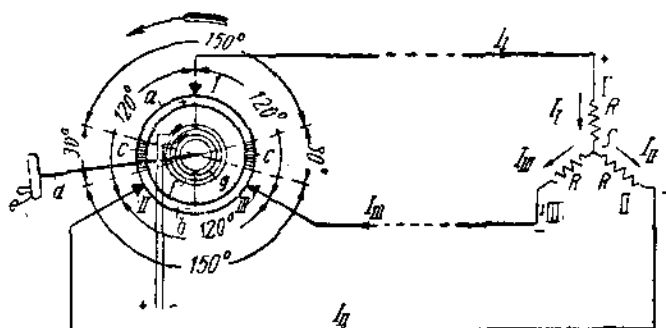


Рис. 2.

на рис. 2. Будем отмечать потенциалы на щетках через каждые 30° поворота коллектора (изолирующий промежуток между пластинами взят в 30°). Вращение производим против часовой стрелки.

На табл. I дано распределение потенциала на щетках.

ТАБЛИЦА I.

Поворот коллектора от исходного положения	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
Щетки													
Щетка I	+	+	+	0	-	-	-	-	-	0	+	+	+
Щетка II	-	0	+	+	+	+	+	0	-	+	+	0	-
Щетка III	-	-	-	-	-	0	+	+	+	+	+	0	-

Допустим, что ключ-коллектор вращается весьма медленно, т. е. частота переключения невелика, в силу чего можно не принимать во внимание явления самоиндукции. Будем попрежнему считать исходным положением положение коллектора, изображенное на рис. 2. Направление вращения также считаем против часовой стрелки. Рассмотрим ряд картин распределения токов в трехфазной обмотке статора ведомого синхронного двигателя при различных положениях коллектора, отличных друг от друга на 30° (аналогично рассмотрению распределения токов в нормальном синхронном двигателе). В исходном положении постоянный ток через кольцо f поступает на пластину a , щетку I, далее по соединительному проводку в фазу I обмотки статора, затем разветвляется по двум параллельно включенным фазам II и III и возвращается через щетки II, III и пластину b к источнику постоянного тока. Благодаря принятому нами медленному вращению коллектора мы при рассмотрении распределения токов будем иметь дело с постоянным током и омическими сопротивлениями трех фаз статора двигателя. Если напряжение источника постоянного тока равно U вольт,

омическое сопротивление одной фазы статора двигателя R омов, то, пренебрегая сопротивлениями соединительных проводов, щеток, переходных контактов и т. п., можем написать, что ток I_1 в фазе I обмотки статора равен

$$I_1 = \frac{U}{R + \frac{1}{2}R} = \frac{U}{\frac{3}{2}R} = \frac{2}{3} \frac{U}{R}.$$

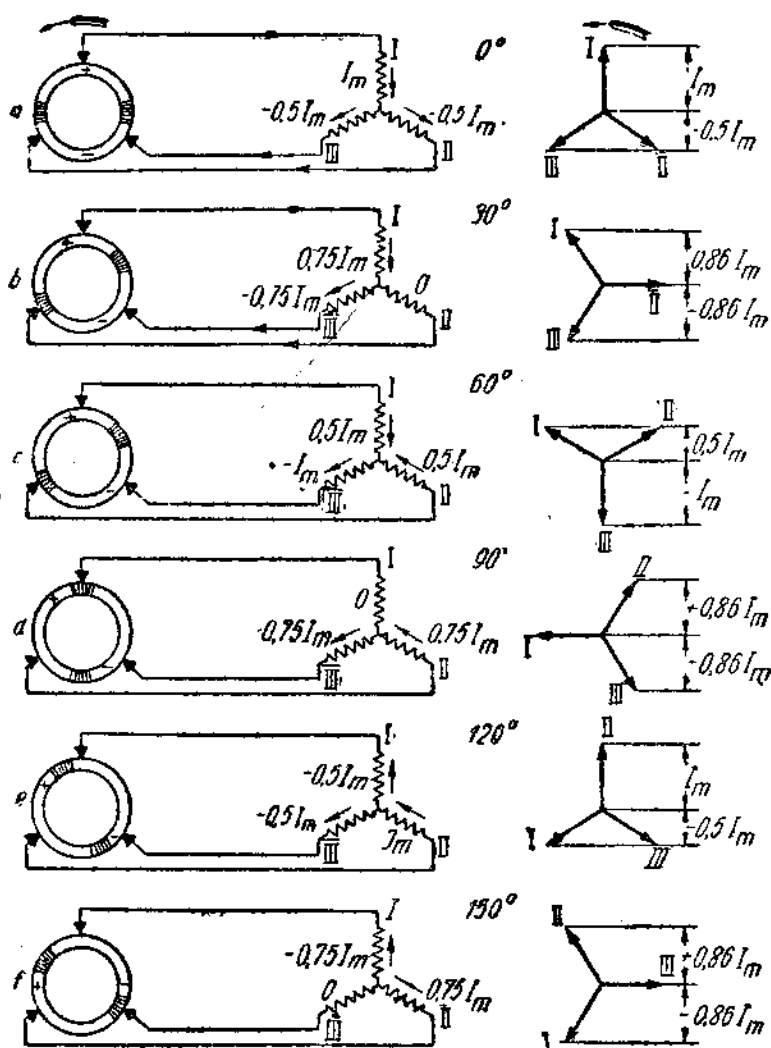


Рис. 3.

В параллельно включенных в данный момент фазах II и III обмотки статора будут проходить токи:

$$I_{II} = I_{III} = \frac{1}{2} I_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} \frac{U}{R} = \frac{1}{3} \frac{U}{R}.$$

Направление токов I_I и I_{III} в фазах противоположно направлению тока I_I (последний протекает от начала фазы к нулевой точке, а токи I_{II} и I_{III} , наоборот — от нулевой точки обмотки к началам фаз). По закону Кирхгофа имеем $I_I + I_{II} + I_{III} = 0$. Таким образом, в рассматриваемый нами момент мы имеем максимум тока в фазе I и половинные значения этого максимума в фазах II и III. Большее значения тока чем I_I в любой из фаз при данном напряжении получить нельзя, так как при таком расположении коллектора имеет место наибольшая проводимость обмотки статора. Если обратиться к распределению тока в нормальном синхронном двигателе, работающем от сети с нормальной частотой, то разобранным распределению токов будет соответствовать в нормальном двигателе такой момент, когда в одной из фаз ток достигает максимального значения, а в двух других — половинного значения от максимума.

Рассмотрим последовательно изменение тока в каждой фазе статора синхронного двигателя, приключенного на ключ-коллектор (рис. 3). Исходное положение нами было уже отмечено. Обозначим максимальное возможное значение тока в фазе через

$$I_m = \frac{2}{3} \frac{U}{R}.$$

Таким образом, в исходный момент (рис. 3, а) имеем

$$I_I = I_m; I_{II} = I_{III} = -0,5 I_m.$$

При повороте ключа на 30° щетка II попадает на изолирующий промежуток (рис. 3, б). В этом положении коллектора

$$I_I = \frac{U}{2R} = 0,75 I_m;$$

$$I_{II} = -\frac{U}{2R} = -0,75 I_m.$$

Повернув коллектор еще на 30° , будем иметь (рис. 3, в):

$$I_{III} = -I_m; I_I = I_{II} = 0,5 I_m.$$

Дальнейшие характерные распределения токов показаны на рис. 3, d, e, f. Все значения токов в отдельных фазах за целый период приводим в таблице II (см. стр. 22).

Кривые изменения тока в каждой фазе, построенные на основании таблицы II, изображены на рис. 4. Таким образом в двухпластинчатом коллекторе-переключателе мы имеем ступенчатую кривую тока, довольно близко совпадающую с синусоидальной, так как отдельные значения тока при поворотах коллектора на 30° находятся в соответствии со значениями

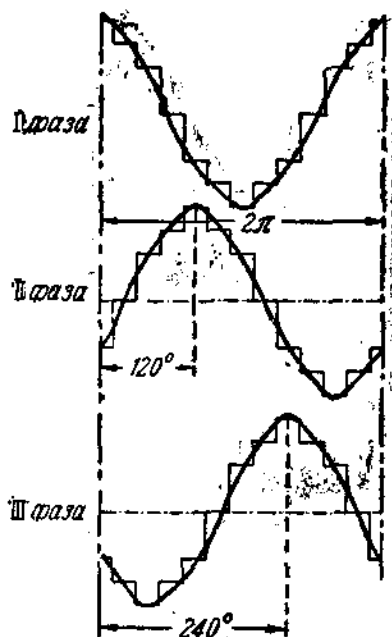


Рис. 4.

ТАБЛИЦА II.

Угол поворота ключа от исходного положения	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
Фаза													
I фаза	Абсол. значение тока	$\frac{2}{3} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{3} \frac{U}{R}$	0	$\frac{1}{3} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	$\frac{2}{3} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{3} \frac{U}{R}$	0	$\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	$\frac{2}{3} \frac{U}{R}$
	Часть от I_m	1,0	0,75	0,5	0	0,5	0,75	1,0	0,5	0	0	0,75	1,0
II фаза	Абсол. значение тока	$\frac{1}{3} \frac{U}{R}$	0	$\frac{1}{3} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	$\frac{2}{3} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{3} \frac{U}{R}$	0	$-\frac{1}{3} \frac{U}{R}$	$-\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	$-\frac{2}{3} \frac{U}{R}$	$-\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	$-\frac{1}{3} \frac{U}{R}$
	Часть от I_m	0,5	0	0,5	0,75	1,0	0,5	0	0,5	0,75	1,0	0,75	0,5
III фаза	Абсол. значение тока	$\frac{1}{3} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	$\frac{2}{3} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	0	$\frac{1}{3} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	$\frac{2}{3} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{2} \frac{U}{R}$	$\frac{1}{3} \frac{U}{R}$	0	$-\frac{1}{3} \frac{U}{R}$
	Часть от I_m	0,5	0,75	1,0	0,75	0,5	0,5	0,75	1,0	0,75	0,5	0	0,5

синусоидального переменного тока, отсчитанного через те же промежутки. На рис. 3 изображены векторные диаграммы трехфазной системы, иллюстрирующие близкое сходство между полученным ступенчатым током и синусоидальным. (Некоторая разница получается в положениях по рис. 3, *b, d, f*).

Из рассмотрения рис. 4 приходим к заключению, что ступенчатые кривые тока в отдельных фазах сдвинуты друг относительно друга по фазе на 120° , т. е. имеет место обычная трехфазная система.

В случае применения изолирующего промежутка не в 30° шириной, а значительно менее, форма кривой тока будет походить менее чем в первом случае на синусоиду. На рис. 5 изображена кривая тока при изолирующем промежутке в 6° .

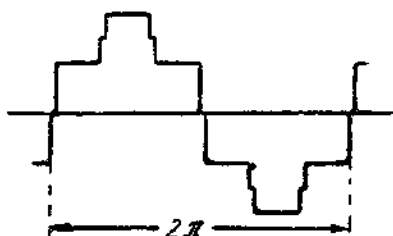


Рис. 5.

Для выяснения порядка высших гармоник в полученной кривой тока на рис. 6 произведено разложение кривой по рис. 4 на основную и высшие гармоники. Как и следовало ожидать по виду кривой тока (большое число ступеней и отсутствие плавности изменения кривой), в ней имеют значение гармоники преимущественно начиная от пятикратной периодичности и выше.

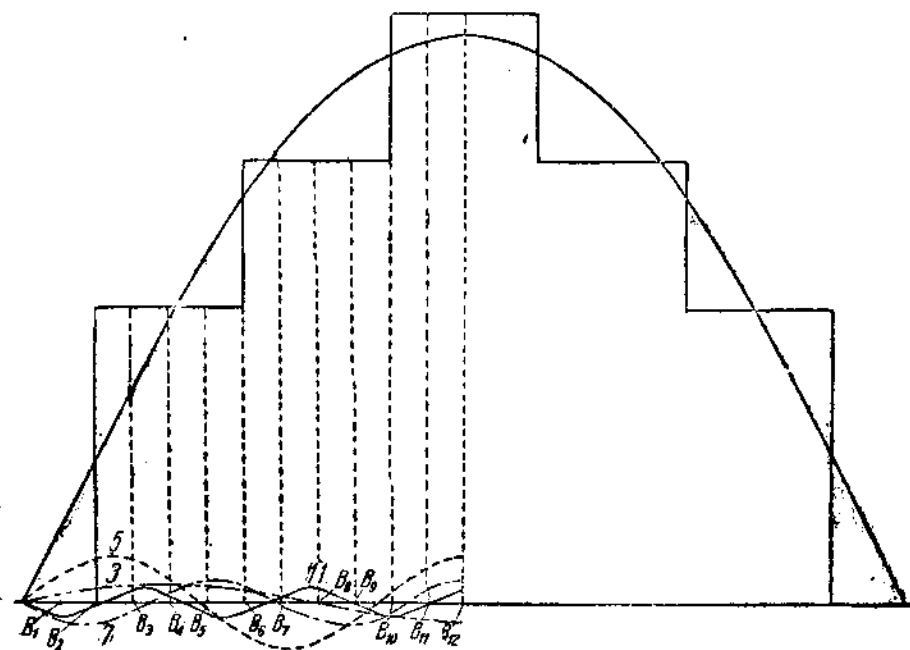


Рис. 6.

Третья гармоника выражена слабо. Разложение произведено до 11-й гармоники включительно. Надо отметить, что амплитуды всех гармоник весьма невелики по сравнению с основной гармоникой. Таким образом, можно считать, что полученное распределение тока в фазах синхронного двига-

теля, питаемого от двухпластинчатого коллектора-переключателя, довольно близко подходит к синусоидальному. Разложение кривой тока, соответствующей коллектору с изолирующим промежутком весьма малой величины, в ряд гармонических изображено на рис. 7, причем найдены лишь

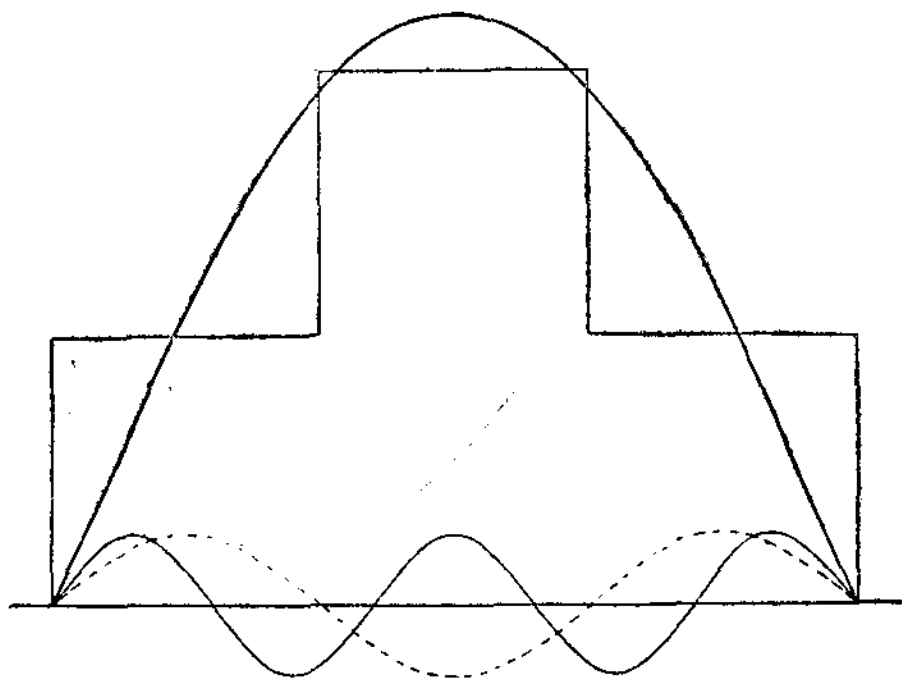


Рис. 7.

основная, третья и пятая гармоники. Высшие гармоники в этом случае получаются больше, так как кривая тока довольно значительно отступает от синусоиды.¹

¹ Разложение кривой тока в ряд гармонических синусоид может быть произведено следующим простым способом.

Как известно, ордината кривой тока, отсчитанная в расстоянии x от начала периода кривой (т. е. при $t = 0$), равна

$$Bx = B_1 \sin x + B_3 \sin 3x + B_5 \sin 5x + \dots$$

В этом разложении отсутствуют члены с косинусами потому, что кривая тока симметрична относительно оси x -ов; по той же причине все гармоники совпадают своими нулевыми значениями с нулевым значением разлагаемой кривой.

Если также принять во внимание, что половины полупериода кривой симметричны относительно средней вертикальной линии, то подсчет амплитуд гармонических синусоид сводится к следующему:

Делим полупериод кривой на $2n$ равных частей и определяем ординаты кривой для этих точек: $B_1, B_2, B_3, \dots, B_{2n-1}$ (см. рис. 6).

Тогда по теореме наименьших квадратов амплитуда первой гармонической определится следующим образом:

$$A_1 = \frac{2}{n} \left\{ B_1 \sin \alpha + B_2 \sin 2\alpha + \dots + \frac{1}{2} B_n \sin n\alpha \right\},$$

где угол $\alpha = \frac{\pi}{2n}$.

19. Магнитодвижущие силы обмотки статора ведомого синхронного двигателя. Изображенный на рис. 4 трехфазный близкий к синусоидальному распределению переменный ток создает в обмотке статора синхронного двигателя три пульсирующие магнитодвижущие силы, сдвинутые по фазе (во времени) на 120 временных градусов и в пространстве на 120 электрических градусов.

В этом отношении имеет место полная аналогия с обычной синхронной машиной, питаемой переменным трехфазным синусоидальным током.

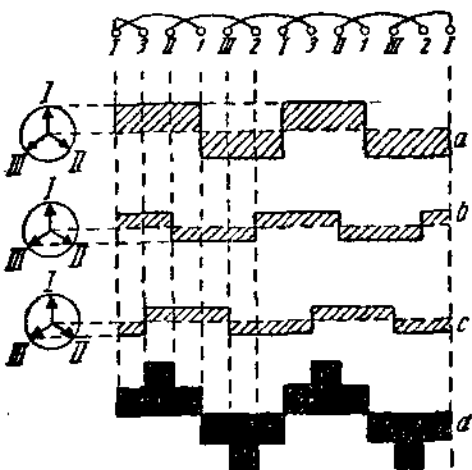


Рис. 8.

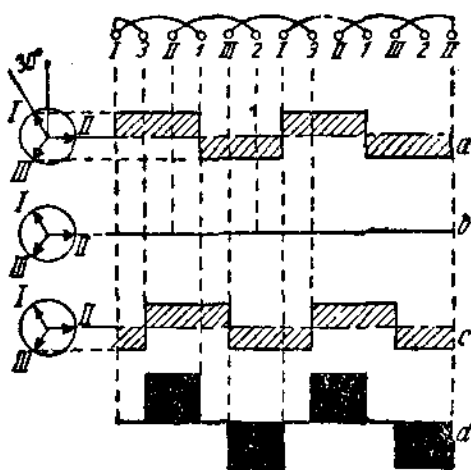


Рис. 9.

В исходном положении коллектора (рис. 3, а) будет иметь место распределение магнитодвижущих сил отдельных фаз, изображенное на рис. 8, а, б, в. Здесь число пазов на полюс и фазу принято равным единице. Начала катушек отдельных фаз обозначены соответственно *I*, *II* и *III*, а концы этих катушек — *1*, *2*, *3*.

Суммарная магнитодвижущая сила (м. д. с.) от всех трех фаз для этого же положения коллектора представлена на рис. 8, *д* (аналогична кривой м. д. с. при синусоидальном токе). При повороте коллектора на 30° кривые м. д. с. будут соответствовать новому распределению токов по рис. 3, б. Эти кривые изображены на рис. 9, а, б, в, причем м. д. с. *II* фазы при этом положении коллектора окажется равной нулю, а м. д. с. *I* и *III* фаз будут взаимнопротивоположны и равны при синусоидальном токе 0,866 от максимального значения фазной м. д. с., а при ступенеобразном — 0,75 от этого значения. Суммарная м. д. с. для второго положения коллектора изображена на рис. 9, *д* (прямоугольная форма). При следующем повороте коллектора на 30° форма суммарной м. д. с. будет аналогична форме

Для амплитуды 3-й гармоники имеем:

$$A_3 = \frac{2}{\pi} \left\{ B_1 \sin 3\alpha + B_2 \sin 6\alpha + \dots + \frac{1}{2} B_n \sin 3n\alpha \right\}.$$

Для амплитуды 5-й гармоники получим:

$$A_5 = \frac{2}{\pi} \left\{ B_1 \sin 5\alpha + B_2 \sin 10\alpha + \dots + \frac{1}{2} B_n \sin 5n\alpha \right\} \text{ и т. д.}$$

м. д. с. при исходном положении коллектора, но максимум ее сдвинется в пространстве на 60 электрических градусов и расположится теперь посередине III фазы, в которой при новом расположении коллектора будет иметь место максимум тока (рис. 10). Таким образом, как и следовало ожидать, суммарная м. д. с. является вращающейся магнитодвижущей силой, меняющей при вращении свою форму от ступенчатой к прямоугольной и от последней формы опять к ступенчатой.

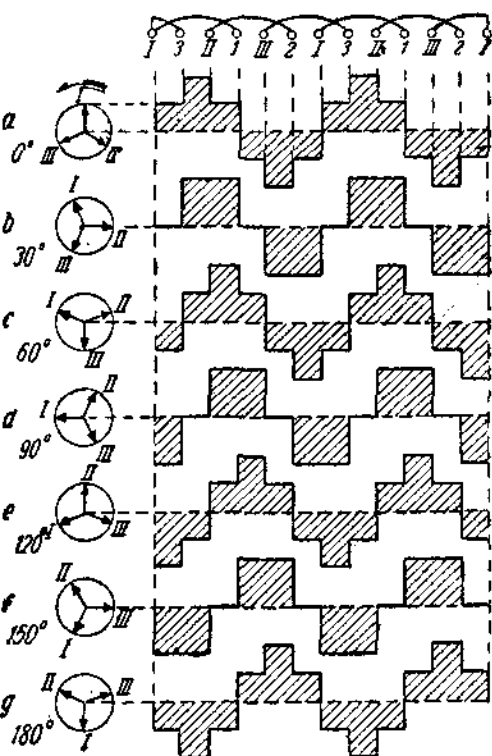


Рис. 10.

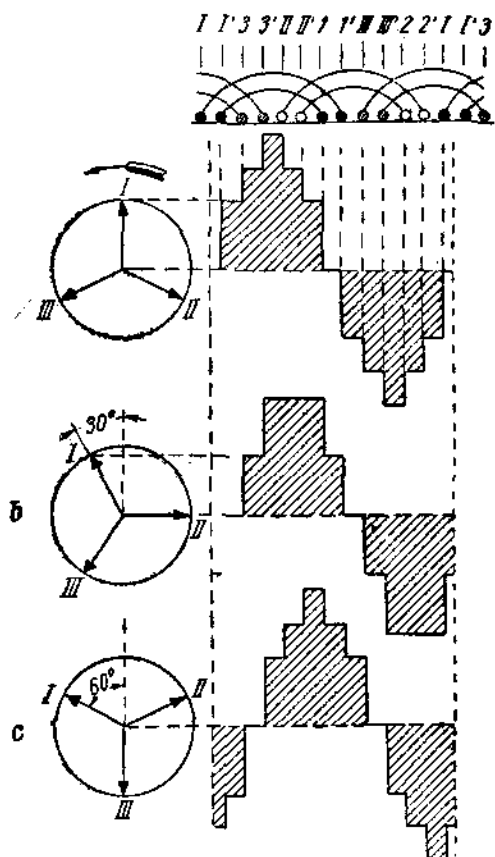


Рис. 11.

Различные положения в пространстве суммарной м. д. с. при различных положениях (через 30°) вращающегося коллектора изображены на рис. 10.

В случае применения большого числа пазов на полюс и фазу, как известно, разница между двумя формами распределения м. д. с. (ступенчатой и прямоугольной) сглаживается. На рис. 11 изображено распределение м. д. с. в статоре синхронного двигателя для трех положений коллектора при числе пазов на полюс и фазу равном двум. Обычно именно на это число пазов на полюс и фазу выполняются синхронные двигатели в схемах синхронной связи с управлением от двухпластинчатого коллектора. Число полюсов берется равным четырем.

Полученные для нашего случая отдельные картины распределения вращающейся суммарной м. д. с. (через 30°), создающей вращающееся магнитное поле, не отличаются от подобных же картин при питании нормального синхронного двигателя синусоидальным током неизменной частоты. Однако имеются и существенные различия. Если рассматривать картины распределения м. д. с. при синусоидальном токе, то следует отметить, что переход от одной формы кривой м. д. с. (например ступенеобразной) к другой (например прямоугольной) происходит совершенно плавно, соответственно плавному изменению синусоидального переменного тока. Так, например, одной из промежуточных кривых м. д. с. при переходе ее от ступенчатой формы к прямоугольной будет кривая, изображенная на рис. 12 и отвечающая повороту векторной системы на 15° . При ступенеобразном токе м. д. с. и магнитное поле переходят от одной формы распределения к другой скачками, т. е. в течение 30° поле остается неизменным по величине, а затем мгновенно меняет свою форму. Благодаря этому и вращение магнитного поля происходит скачками, имеющими место через каждые 30° поворота ключа-коллектора при изоляционном промежутке между пластинами в 30° . При весьма малом изоляционном промежутке скачки происходят приблизительно через 60° поворота ключа (рис. 5). Подобными же скачками будет двигаться синхронно с полем и ротор двигателя.

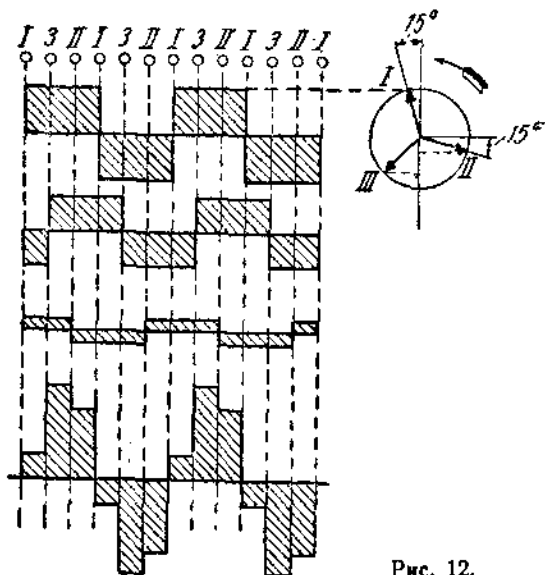


Рис. 12.

Вращение магнитного поля при синусоидальном токе неизменной частоты происходит плавно и равномерно. В рассматриваемом же случае промежутков времени между одним распределением в пространстве магнитного потока и другим его распределением может быть сколько угодно велик, что зависит от быстроты вращения ключа, определяющей частоту переменного тока, преобразованного из постоянного. Ранее было отмечено, что при неподвижном ключе-коллекторе в обмотку статора ведомого синхронного двигателя поступает постоянный ток, создающий в междуфазном пространстве двигателя неизменное магнитное поле, ориентирующее относительно себя неподвижный ротор. В этом случае последний удерживается магнитным полем в определенном положении точно так же, как и в нормальном синхронном двигателе при работе. Указанное неподвижное магнитное поле (при неподвижном коллекторе) можно назвать „застывшим“ вращающимся магнитным полем, создаваемым переменным током с частотой равной нулю. Двигатель, питаемый таким переменным током с частотой равной нулю, сохраняет все свойства синхронного двигателя и прежде всего синхронное число оборотов, которое в этом частном случае ока-

жется равным нулю. Формула для числа оборотов синхронного двигателя остается справедливой, а именно

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 0}{p} = 0.$$

Синхронизирующий момент между полем статора и ротором и в этом случае будет иметь место. Очевидно, что мощность, развиваемая на валу двигателя, окажется равной $P_2 = M\omega = M \cdot 0 = 0$. (Более подробно см. главу, посвященную работе синхронных двигателей при меняющейся частоте.)

При повороте ключа на 30° заставшее вращающееся поле передвинется по окружности статора и получит новую форму распределения, причем оно останется неизменным (в пространстве и во времени) до нового поворота, который последует лишь при необходимости переместить управляемый двигатель еще на 30° . Само собой разумеется, что указанному передвижению поля будет соответствовать переход в новое положение ротора. Если вращение ключа производится непрерывно, то разница между нормальным синусоидальным током неизменной частоты и током в рассматриваемой схеме синхронной связи уменьшается тем сильнее, чем быстрее и равномернее происходит вращение, так как ступенеобразный переменный ток с увеличением числа периодов начинает все более походить на синусоидальный ток. Скачкообразное движение ротора (в соответствии со скачкообразным движением магнитного поля статора) при возрастании скорости благодаря инерции вращающихся частей переходит в плавное движение. Работа синхронного двигателя при меняющейся частоте и при несинусоидальном токе будет рассмотрена далее, здесь же существенно лишь отметить те особенности, которые вносит питание двигателя от ключа-коллектора.

Максимальное значение магнитодвижущей силы в ампервитках, создаваемой трехфазной обмоткой ведомого двигателя, может быть определено следующим образом.

На основании построения кривой м. д. с. по рис. 8 можем написать (для трехфазной машины)

$$AW_a = 2 I_m w_\phi,$$

где w_ϕ — полное число витков на фазу (для p пар полюсов), I_m — максимальное значение тока в фазе.

При q пазах на полюс и фазу имеем

$$AW_a = 2 I_m k_w w_\phi,$$

где k_w — обмоточный коэффициент, учитывающий, что складываемые м. д. с. отдельных катушек взаимно сдвинуты на угол $\alpha = \frac{\pi}{Q}$, где Q — число пазов на полюс.

Ранее было установлено, что при малой скорости коллектора-переключателя

$$I_m = \frac{2}{3} \frac{U}{R}.$$

Подставляем значение для I_m в полученное выражение для м. д. с.

$$AW_a = \frac{4}{3} \frac{U}{R} k_w w_\phi.$$

При распределении тока по рис. 9 величина его в фазах I и II равна $0,75 I_m$. Следовательно, для этого случая величина м. д. с. будет иметь значение:

$$AW_a = \frac{U}{R} k_w w_\Phi.$$

Если исходить из синусоидального распределения по полюсному делению м. д. с., создаваемой одной фазой, а не прямоугольного, как это происходит в действительности, тогда выражение для м. д. с. в ампервитках примет следующий вид.

М. д. с. для одной катушки:

$$aw_k = \frac{4}{\pi} \sqrt{2} I w \sin \omega t.$$

Здесь I — действующее значение синусоидального переменного тока; w — число витков в катушке.

Наибольшее значение м. д. с.

$$aw_k = \frac{4}{\pi} \sqrt{2} I w.$$

При нескольких катушках на пару полюсов и фазу

$$aw_k = \frac{4}{\pi} \sqrt{2} I_w k w.$$

На всю фазу имеем:

$$aw_\Phi = \frac{4}{\pi} \sqrt{2} I w_\Phi.$$

Известно, что вообще всякая m -фазная обмотка, состоящая из m взаимно сдвинутых пространственно на $\frac{2\pi}{m}$ полюсного шага однофазных обмоток, при прохождении по ней m -фазного тока создает вращающуюся синхронно с ротором м. д. с., составляющую $\frac{m}{2}$ от м. д. с. одной фазы.

Таким образом вращающаяся м. д. с. многофазного синхронного двигателя равна (при синусоидальном распределении м. д. с. отдельных фаз)

$$AW_a = 0,9 \cdot m \cdot k_w \cdot I \cdot w_\Phi.$$

Амплитуда кривой распределения м. д. с. по окружности ротора равна половине м. д. с. силы, так как последняя распределяется на два междужелезных пространства, через которые проходит поток, создаваемый указанной м. д. с. (сопротивлением пути магнитного потока по железу пренебрегаем).

Выражение для амплитуды кривой м. д. с. имеет такой вид:

$$AW_A = \frac{m}{2} \cdot 0,9 \cdot k_w \cdot I \cdot w_\Phi.$$

20. Искрение на коллекторе. Ступенеобразное изменение тока вызывает значительное искрение на коллекторе. При переходе щетки на изолирующий промежутки происходит разрывание в соответствующей фазе цепи тока, по величине равного половине максимального значения. Магнитная энергия обмотки переходит в тепловую и световую энергию вольтовой дуги, устанавливающейся между коллекторной пластиной и щеткой. Это обстоятельство сокращает срок службы указанных частей. Для ослабления искрения

применяют искрогасители в виде конденсаторов, активных сопротивлений или комбинаций того и другого.

Указанными искрогасителями шунтируют возникающий при разрыве цепи фазы искровой промежутка.

На рис. 13 изображена схема коллектора-переключателя с искровыми промежутками, шунтированными при помощи конденсаторов C и активных сопротивлений r . Последние применены для погашения колебательного процесса в контуре: обмотка двигателя — конденсаторы.

Рассматриваемый коллектор-переключатель относится к типу так называемых коллекторных механических преобразователей электрического тока одного рода в другой (переменного тока в постоянный и наоборот).

Общий недостаток таких преобразователей — невозможность применения больших мощностей благодаря искрообразованию.

Мощность механического преобразователя может быть повышена путем применения особого рода контактов (например ионный контакт). Однако такие контакты могут иметь место в преобразователях высокого напряжения, ко-

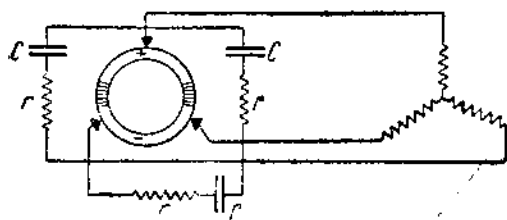


Рис. 13.

торое требует так или иначе преобразования в пониженное рабочее напряжение для питания ведомых двигателей. Обычно максимальная мощность коллекторов-ключей, в силу указанных выше причин, при наличии искрогасителей составляет $200 \div 300$ VA, что сводит функции подобной системы к области сигнализации и сообщению механических перемещений с малыми моментами (например управление серводвигателями). Для непосредственного управления деталями исполнительного механизма мощность коллекторов-переключателей часто оказывается недостаточной.

Расчет и подбор искрогасителей делается обычно довольно приблизительно, так как приходится ориентироваться на их средние значения благодаря работе коллектора на преобразование тока меняющейся частоты. Поэтому при больших скоростях могут возникнуть перенапряжения в результате резонанса напряжений (колебаний электромагнитной энергии между емкостью искрогасителя и самоиндукцией обмотки двигателя).

ГЛАВА V.

КОЛЛЕКТОР-КЛЮЧ СИСТЕМЫ МАРУГИНА.

21. Устройство ключа. Двухпластинчатый коллектор-переключатель может иметь лишь весьма небольшую мощность вследствие плохой коммутации. Современные требования заставляют применять более мощные ключи.

К последним принадлежит коллектор-ключ системы Маругина, также преобразующий постоянный ток в переменный ток переменной частоты. С целью улучшения коммутации коллектор выполнен из большого количества пластин, соединенных с реостатом из активного сопротивления. Коллектор сделан неподвижным, с вращающимися по его окружности щетками, число которых равно требуемому числу фаз (обычно три). Указанный кол-

лектор-ключ схематически изображен на рис. 14. Коллекторные пластины соединены с отдельными точками реостата R , к которому в двух диаметрально расположенных точках подведено напряжение постоянного тока. На коллекторе под углом в 120° установлены три щетки A, B, C , укрепленные на вращаемой при помощи рукоятки S крестовине P . Для передачи получаемого на щетках A, B, C переменного напряжения в линию служат неподвижные кольца K_1, K_2 и K_3 , по которым скользят щетки a, b, c , укрепленные на той же крестовине и электрически соединенные соответственно со щетками A, B, C . Коллектор может быть взят дискового или цилиндрического типа. Конструкция вращающейся щеточной траверсы, равно как и контактного устройства с кольцами, делается весьма различной.

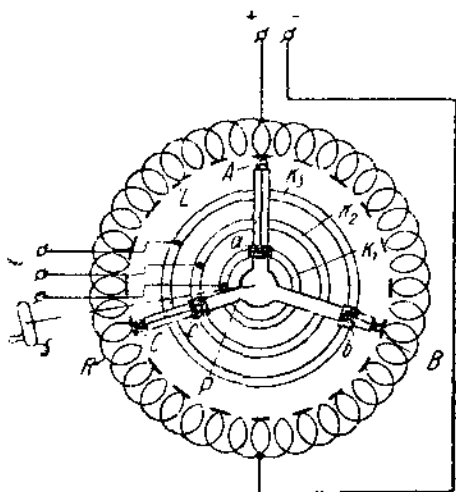


Рис. 14.

22. Кривая напряжения. Благодаря применению реостата напряжение на щетках будет меняться значительно более плавно, чем в предыдущем случае. Реостат играет роль потенциометра, по которому передвигаются движки-щеточки. Величина напряжения между двумя коллекторными пластинами будет равна падению напряжения в сопротивлении секции реостата, присоединенной между этими пластинами.

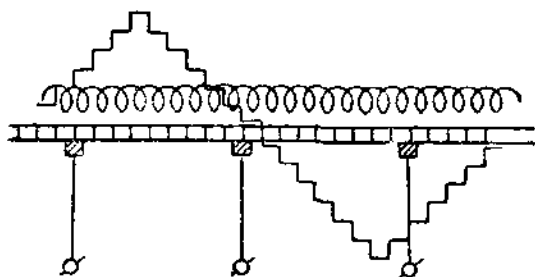


Рис. 15.

На рис. 15 изображена кривая изменения напряжения по коллектору системы Маругина (коллектор представлен в развернутом виде).

При большом числе пластин ступенчатая кривая по рис. 15 близко подходит к кривой треугольной формы, изображенной на рис. 16.

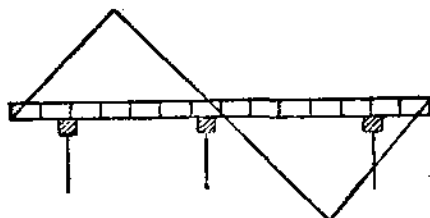


Рис. 16.

23. Кривые тока в приемнике и реостате. Установим теперь характер изменения тока в простейшем случае, т. е. при незначительной скорости вращения щеток, когда можно считать, что двигатель представляет собой чисто активное сопротивление.

Рис. 14.

Для простоты возьмем коллектор системы Маругина для преобразования постоянного тока в однофазный переменный (рис. 17).

Предположим, что сопротивление каждой из параллельных ветвей реостата равно R , а сопротивление приемника (например фазы двигателя) — r , время поворота щеток на 180° равно T' (вращение считаем равномерным).

За исходное положение примем такое положение щеток $A-B$, при котором щетка A стоит на пластине, соединенной с точкой a , приключенной к линии питающего реостат постоянного тока (например плюс источника постоянного тока), а щетка B соответственно находится на диаметрально противоположной пластине (точка b соединена, например, с минусом источника постоянного тока). Время, истекшее при повороте щеток от исходного положения до рассматриваемого, обозначим через t (таким образом

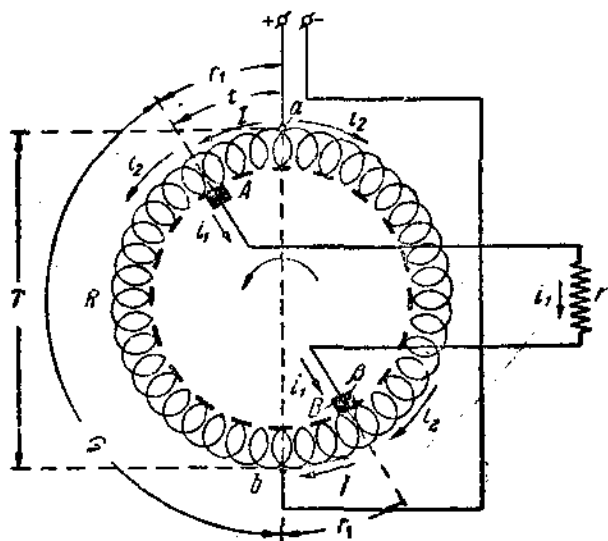


Рис. 17.

в исходном положении $t=0$, а при повороте щеток на $180^\circ t=T'$).

Взяв какое-либо промежуточное положение (между 0° и 180°), получим изображенное на рис. 17 распределение тока. Поступающий в левую часть реостата ток I в точке расположения щетки A разветвляется на два тока i_2 и i_1 , из которых ток i_1 поступает в приемник. В другой половине реостата имеет место обратное явление: в точке расположения щетки B токи i_1 и i_2 складываются, образуя общий ток I (аналогично мосту Витстона).

Для рассматриваемого положения щеток можем написать следующие уравнения:

$$U = I r_1 + i_2 r_2, \quad (1)$$

где U — приложенное напряжение постоянного тока, r_1 — сопротивление участка реостата от точки a до щетки A , r_2 — сопротивление участка реостата от щетки A до точки b .

$$i_1 r = U - 2 I r_1. \quad (2)$$

(рассматриваем цепь от точки a до точки b с последовательно включенными сопротивлениями $r_1 - r - r_1$).

$$I = i_1 + i_2. \quad (3)$$

При равномерном вращении щеток по коллектору можем написать:

$$r_1 = R \frac{t}{T'} \text{ и } r_2 = R \frac{T' - t}{T'}$$

(при $t=0$, $r_1=0$, а $r_2=R$; при $t=T'$ имеет место обратное соотношение).

Очевидно, что вообще вместо величин T' и t можно было бы взять длины полуокружности коллектора L и меняющейся дуги l , пройденной щетками.

Подставляем в уравнение (1) вместо r_1 и r_2 их указанные значения и заменяем $I=i_1+i_2$:

$$U=(i_1+i_2)R\frac{t}{T'}+i_2R\frac{T'-t}{T'}. \quad (4)$$

Производим следующие преобразования:

$$U=i_1R\frac{t}{T'}+i_2R\frac{t}{T'}+i_2R\frac{T'-t}{T'}=i_1R\frac{t}{T'}+i_2R\left(\frac{t}{T'}+\frac{T'-t}{T'}\right),$$

что даст

$$U=i_1R\frac{t}{T'}+i_2R.$$

Отсюда

$$i_2=\frac{U-i_1R\frac{t}{T'}}{R}.$$

Далее преобразуем уравнение (2), подставив $I=i_1+i_2$:

$$i_1r=U-2Ir_1.$$

$$i_1r=U-2(i_1+i_2)r_1,$$

отсюда

$$i_1(r+2r_1)=U-2i_2r_1.$$

Подставим найденные выше значения для r_1 , r_2 и i_2 :

$$i_1\left(r+2R\frac{t}{T'}\right)=U-2R\frac{t}{T'}\left(\frac{U-i_1R\frac{t}{T'}}{R}\right).$$

Преобразуем

$$i_1\left(r+2R\frac{t}{T'}\right)=U-2U\frac{t}{T'}+i_12\frac{t}{T'}R\frac{t}{T'}$$

или

$$i_1\left[r+2R\frac{t}{T'}-2\frac{t}{T'}R\frac{t}{T'}\right]=U\left(1-2\frac{t}{T'}\right).$$

Отсюда окончательно получаем

$$i_1=U\frac{1-2\frac{t}{T'}}{r+2R\frac{t}{T'}\left(1-\frac{t}{T'}\right)}. \quad (5)$$

Как видно из последнего выражения, форма кривой тока i_1 зависит от соотношения между сопротивлением r приемника и сопротивлением R полувинны реостата. (Форма напряжения будет такой же, так как $U_p=i_1r$).

Задаваясь различными характерными частными значениями t , получим:

$$\begin{aligned} \text{для } t=0 & \quad i_1 = \frac{U}{r}, \\ \text{„ } t=\frac{T}{2} & \quad i_1 = 0, \\ \text{„ } t=T & \quad i_1 = -\frac{U}{r}, \\ \text{„ } t=\frac{1}{4}T & \quad i_1 = \frac{U}{2r + \frac{3}{4}R}. \end{aligned}$$

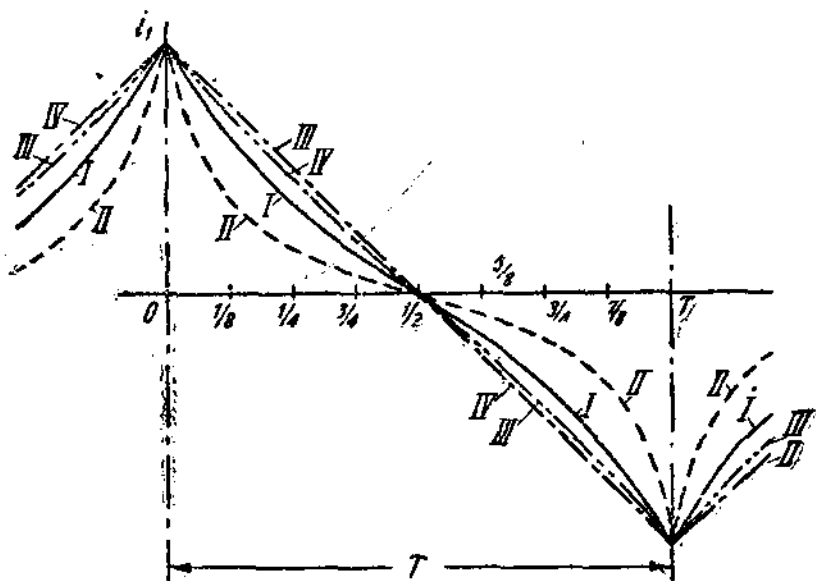


Рис. 18.

При очень малом R по сравнению с r для промежуточных положений между

$$t=0 \text{ и } t=\frac{T}{2}$$

имеем

$$i_1 = \frac{U}{2r},$$

т. е. треугольную форму тока, подобную форме напряжения по рис. 16.

На рис. 18 представлены кривые для нескольких частных случаев соотношения между r и R , а именно: кривая I для $\frac{r}{R}=1$; кривая II для $\frac{r}{R}=\frac{1}{5}$ (в этом случае кривая имеет сильное отклонение от треугольника); кривая III для $\frac{r}{R}=10$ (кривая довольно близко подходит к треугольнику).

Треугольная форма кривой, как известно, имеет сильно выраженную третью гармонику (рис. 19).

В случае наличия более заостренной кривой, чем треугольник (кривые I и II на рис. 18), третья гармоника выступает еще сильнее, причем начинает сказываться и пятая гармоника.

Наличие в токе высших гармонических может повлечь за собой при значительной величине этих гармонических уменьшение рабочего момента двигателя и неустойчивость его синхронной работы.

Представленные на рис. 18 кривые тока для однофазной нагрузки справедливы и для отдельных фаз трехфазной нагрузки при соединении этих фаз треугольником, причем токи в отдельных фазах благодаря сдвигу щеток на 120° будут также сдвинуты на 120° друг относительно друга. Если же обмотка приемника соединена в звезду, то в цепи такой трехфазной системы третья гармоника тока не может иметь места, так как мгновенные значения третьих гармоник двух смежных фаз разнятся по времени на $1/3$ периода основной синусоиды, что составляет для третьей гармонической целый период (для девятой гармонической соответственно три полных периода и т. д.). Поэтому все высшие гармонические порядка кратного трем в разных фазах отличаются друг от друга на целое число периодов этих гармонических и взаимно уравниваются. Таким

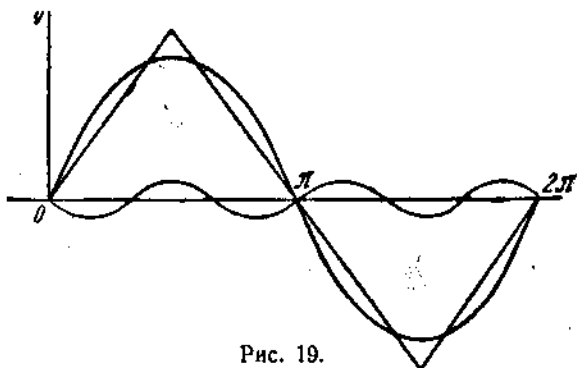


Рис. 19.

образом при скорости щеток, отличной от нуля, форма тока должна приближаться к синусоидальной в случае соединения приемной трехфазной системы в звезду (такое соединение обычно имеет место).

При работе со скоростью вращения щеток, отличной от нуля, могут иметь место два случая: коэффициент мощности ведомого синхронного двигателя равен единице и указанный коэффициент не равен единице.

В первом случае синхронный двигатель может быть заменен эквивалентным ему по проводимости активным сопротивлением, во втором же случае соотношения токов и выражение для тока i_1 получаются несколько сложнее, так как мы имеем геометрическое суммирование токов i_1 и i_2 . При изменении скорости вращения щеток или нагрузочного момента на валу ведомого двигателя проводимость его обмотки будет меняться, а следовательно будет меняться и кривая тока (изменение соотношения между z и R).

Ток i_2 в реостате также не остается неизменным, так как на его величине будет сказываться изменение падения напряжения на участке реостата, по которому проходит меняющийся суммарный ток $I = i_1 + i_2$ (рис. 17).

Обратимся к уравнению для тока i_2 (при скорости щеток близкой к нулю). Как было установлено ранее,

$$i_2 = \frac{U - i_1 R - \frac{t}{T}}{R};$$

величина тока i_1 определяется из уравнения

$$i_1 = U \cdot \frac{1 - \frac{2t}{T}}{r + 2R \frac{t}{T} \left(1 - \frac{t}{T}\right)}.$$

Подставляя значение i_1 в уравнение для i_2 , получим:

$$i_2 = \frac{U - U \frac{1 - \frac{2t}{T}}{r + 2R \frac{t}{T} \left(1 - \frac{t}{T}\right)} \cdot R \frac{t}{T}}{R},$$

или, преобразуя, имеем

$$i_2 = \frac{U}{R} \left(\frac{r + R \frac{t}{T}}{r + 2R \frac{t}{T} \left(1 - \frac{t}{T}\right)} \right). \quad (6)$$

Если построить кривую тока i_2 для какого-либо частного случая, например $\frac{r}{R} = 1$, то получим (рис. 20) кривую, минимум которой имеет место при повороте щеток на $\frac{\pi}{4}$

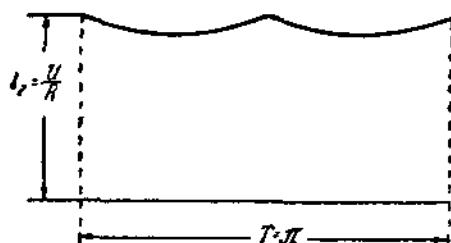


Рис. 20.

(сила тока колеблется в пределах $9 \div 10\%$). При $\frac{r}{R} = \infty$, т. е. при $R \cong 0$, значение i_2 становится неизменным. Чем меньше значение отношения $\frac{r}{R}$, тем сильнее изгиб кривой i_2 , что соответствует большей остроте кривой для i_1 (рис. 18, кривая II).

Из рассмотрения распределения токов в реостате и приемнике приходим к заключению, что отдельные части сопротивления реостата будут обтекаться различными токами, меняющимися во времени.

Уже отмечалось, что в реостате будет проходить суммарный ток $I = i_1 + i_2$, на который и надлежит рассчитывать отдельные секции реостата. На рис. 21 представлена суммарная кривая максимальных значений тока в секциях реостата в зависимости от расстояния секции от точек присоединения реостата к питающей линии (для простоты форму кривой тока приемника считаем треугольной, а величину тока i_2 в реостате неизменной). В каждой из секций имеет место свое максимальное значение тока. Так, в секции x , находящейся на расстоянии x от точки a (в данном частном случае $x = \frac{\pi}{4}$), максимальное значение тока $I = i_1 + i_2 = \frac{1}{2} i_1 \max + i_2$. Сечение секции, находящейся на расстоянии $\frac{\pi}{2}$ от точки a , надлежит рассчитывать на ток $I = i_2 = \frac{U}{R}$.

В каждой секции реостата ток будет меняться по своей кривой, отличной от кривой тока соседней секции.

На рис. 22 представлены кривые тока для различных характерных по своему положению секций реостата (положение определяется угловым расстоянием секции по коллектору от точки присоединения питающего

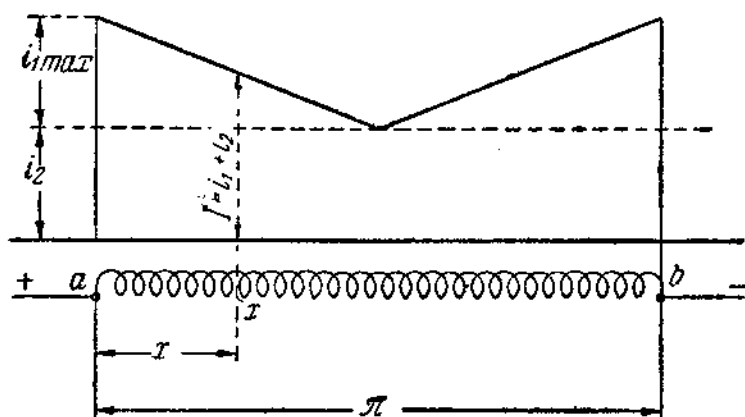


Рис. 21.

реостат проводника). Наибольший ток несет секция, находящаяся в непосредственной близости с питающим проводником (угол сдвига 0°). Секция, расположенная по середине ветви сопротивления реостата (сдвиг в 90°), несет минимальный неизменный по величине ток i_2 (вернее — примерно неизменный).

Таким образом каждая секция, вообще говоря, может быть рассчитана на действующее значение протекающего по ней тока. Однако конструирование по такому расчету на практике в большинстве случаев может оказаться слишком сложным, и поэтому сечение секций реостата часто рассчитывают исходя из действующего значения наиболее нагруженной током секции, делая реостат неизменного сечения.

Подбор наиболее выгодного соотношения $\frac{r}{R}$ может быть решен путем технического (форма кривой тока) и экономического сопоставлений различных вариантов.

Пользуясь приведенными обоснованиями, нетрудно построить кривые изменения тока в реостате и отдельных его секциях при преобразовании постоянного тока в трехфазный.

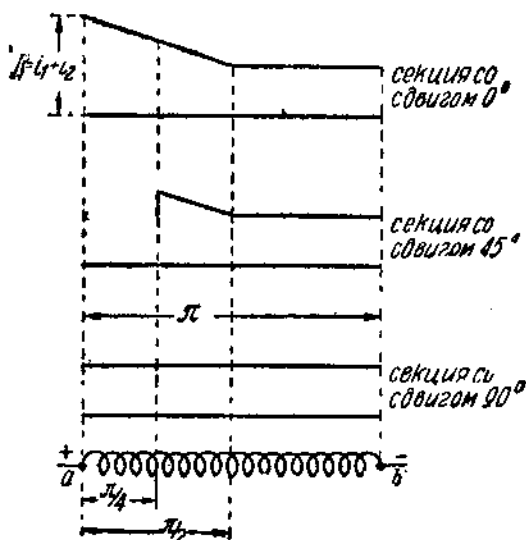


Рис. 22.

24. Мощность ключа системы Маругина. Мощность рассмотренного преобразователя вообще неограничена. Она зависит лишь от размеров системы, т. е. размеров коллектора и реостата.

Искрение в таком преобразователе будет иметь место главным образом при малых скоростях вращения. От одного такого преобразователя обычно приводят в действие двигатели мощностью до 0,37 kW и числом до 10 параллельно работающих единиц.

Существенными недостатками ключа Маругина являются, во-первых, большие потери в реостате, сильно снижающие коэффициент полезного действия установки, и, во-вторых, громоздкость ключа при больших мощностях, утяжеляющая привод его и уменьшающая точность управления.

Кроме того, форма напряжения несколько далека от наиболее выгодной формы напряжения — синусоиды. Подобный коллектор-ключ имеет довольно ограниченное применение.

ГЛАВА VI.

КОЛЛЕКТОР-КЛЮЧ СИСТЕМЫ БАРЬЕ-БЕНАРА (BARBIER-BENARD).

25. Устройство ключа-преобразователя. Ключ Барье-Бенара представляет собой комбинацию ключа Маругина с простым двухпластинчатым коммутатором-переключателем. Ключ имеет широкие пластины c, d (рис. 23), соединенные в точках a и b с источником постоянного тока. Между пластинами c и d расположен ряд узких (как в обычном коллекторе машины

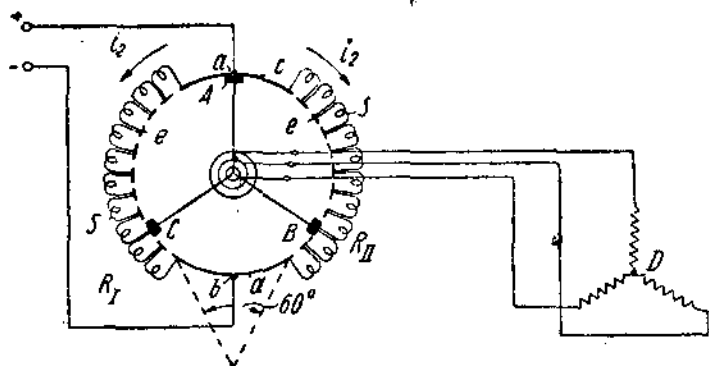


Рис. 23.

постоянного тока) пластин, отделенных друг от друга изолирующими промежутками и присоединенных к секциям реостатов R_I и R_{II} . На коллекторе установлены три вращающиеся на общей траверзе щетки A, B, C , соединенные с кольцами для питания трехфазным током управляемого двигателя D или нескольких параллельно включенных двигателей. Ключ изображен на рис. 23 схематически, без указания соединений между щетками и кольцами и т. д.

Устройство вращающейся щеточной траверзы может быть выполнено самым различным образом, в частности таким, как это изображено на рис. 14 для ключа Маругина.

26. Форма кривой напряжения при однофазном токе. При достаточно большом количестве промежуточных коллекторных пластин, находящихся между широкими пластинами c и d , форма кривой переменного однофазного напряжения (при двух щетках на коллекторе) будет иметь очертания равнобокой трапеции, как это изображено на рис. 24 для развернутого коллектора. При прохождении диаметрально расположенных щеток по широким пластинам возникает неизменный максимум напряжения (средняя часть трапеции). С переходом щеток на промежуточные пластины e напряжение начнет плавно уменьшаться благодаря все увеличивающемуся падению напряжения в реостате.

Форма равнобокой трапеции значительно ближе подходит к синусоиде, чем треугольник и в особенности прямоугольник. Это обстоятельство выгодно отличает ключ Барбье-Бенара от ранее рассмотренных двух типов ключей-коллекторов. Кроме того, выбирая ту или иную ширину пластин c

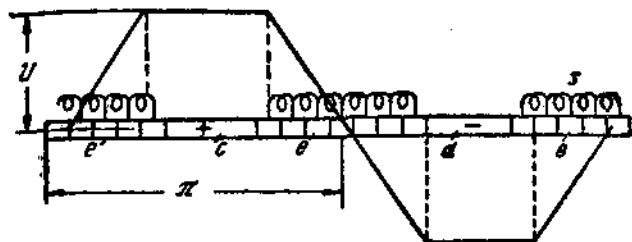


Рис. 24.

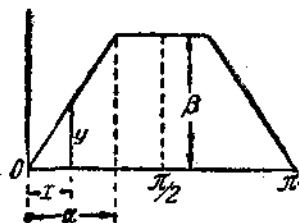


Рис. 25.

и d , мы можем влиять на степень приближения трапеции к синусоиде, устраняя соответственные гармоники.

Для выяснения наивыгоднейшей ширины пластин c и d рассмотрим разложение в ряд Фурье кривой трапециевидальной формы.

В наклонной части кривой (рис. 25) от $x = 0$ до $x = \alpha$ (α — основание треугольника, образованного наклонной стороной и перпендикуляром, опущенным из верхнего угла трапеции) кривая может быть представлена уравнением:

$$y = f(x) = B \frac{x}{\alpha}.$$

В прямой же части (от $x = \alpha$ до $x = \pi = \alpha$) имеем уравнение:

$$y = f(x) = B.$$

Так как трапеция симметрична относительно оси x -ов, а также относительно средней линии по отношению к точкам пересечения с осью абсцисс, то все четные гармоники будут равны нулю, а все нечетные своими нулевыми значениями совпадут с нулевым значением разлагаемой кривой.

Приравнявая значение порядка гармоник соответственно 1, 3, 5 и т. д., имеем следующий ряд для трапеции:

$$y = \frac{4B}{\pi} \left(\sin \alpha \cdot \sin x + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3x + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin 5x + \dots + \frac{1}{k^2} \sin k\alpha \sin kx \right). \quad (7)$$

Величина гармоник зависит от угла α . Последний можно подобрать так, чтобы определенные гармоники пропали. Для этого нужно, чтобы

$$\frac{1}{k^2} \sin k\alpha \sin kx = 0, \quad (8)$$

т. е. чтобы $\sin k\alpha = 0$. Последнее возможно при $\alpha = \frac{\pi}{k}$, где k — порядок гармоники, которую желают устранить из кривой вместе со всеми гармониками, порядок которых кратен данной.

Наиболее значительной является третья гармоника. Поэтому, приравняв

$$\frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3x = 0,$$

имеем $\alpha = \frac{\pi}{3} = 60^\circ$, т. е. если взять величину $\alpha = 60^\circ$ (а следовательно, 60° равняется ширине пластин c и d , соответствующих горизонтальной части трапеции), то в ряде Фурье члены $\sin 3\alpha$, $\sin 9\alpha$ и т. д. превращаются в нуль, что свидетельствует об отсутствии в равнобокой трапеции с величиной $\alpha = 60^\circ$ третьей и кратных трех гармоник. Такая трапециoidalная кривая весьма близко подходит к синусоиде, так как содержит лишь

пятую, седьмую, одиннадцатую и т. д. гармоники, причем пятая гармоника составляет лишь 4%, седьмая 2,04% от высоты трапеции (рис. 26).

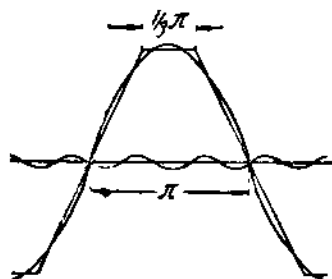


Рис. 26.

27. Форма кривой напряжения при трехфазном токе. Посмотрим теперь, как будет изменяться напряжение при трех щетках, расположенных по окружности со сдвигом в 120° . Ширину пластин c и d (рис. 23) примем равной 60° . В этом случае при вращении щеток имеют место два положения щеток: первое положение, когда одна щетка (рассматриваем изменение напряжения между какими-либо двумя щетками), например

щетка A (рис. 23), расположена на пластине c , а другая щетка, например B , находится на промежуточных пластинах e . Второе характерное положение имеет место при нахождении обеих щеток на промежуточных пластинах e . Когда одна щетка движется по пластине c , а другая по промежуточным пластинам, происходит изменение напряжения вдвое менее интенсивное, чем при движении обеих щеток по промежуточным пластинам. При симметричном положении щеток относительно пластины c или d напряжение равно нулю. Благодаря тому что щетки расположены под углом в 120° , а пластины c и d под углом в 180° , момента, когда обе щетки находятся на указанных пластинах, не будет (при $\alpha = 60^\circ$), следовательно, в кривой напряжения не будет горизонтальных участков, как это имело место при преобразовании постоянного тока в однофазный с расположенными по диаметру щетками (рис. 24). Таким образом кривая напряжения при трех щетках в случае большого числа промежуточных пластин получает остроконечную форму (рис. 27), образованную, если рассматривать $1/4$ периода, двумя прямолинейными участками равной высоты, один из которых расположен на протяжении $1/12$ части периода (30°), а другой на протяжении $1/6$ периода (60°), причем наклон первой линии вдвое круче, чем второй. Полученная кривая настолько близко подходит по своей форме

к синусоиде, как это видно из рис. 27, что ее с достаточной степенью точности можно принять за синусоиду.

Беря различную ширину пластин c и d , можно менять соотношение между отмеченными прямолинейными участками, причем в том случае, когда пластины c и d делаются равными промежуточным пластинам e , мы получаем треугольную форму изменения напряжения (ключ Маругина).

28. Применение преобразователя. Рассмотренный преобразователь Барбье-Бенара является более совершенным преобразователем, чем предыдущие, и может применяться в довольно мощных установках для управления непосредственно приводными двигателями, а не только серводвигателями в несколько десятков вольтампер.

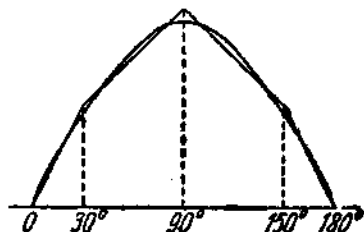


Рис. 27.

29. Преобразователь с кривой напряжения, весьма близкой к синусоиде. Получаемая кривая напряжения от преобразователя может быть еще точнее приближена к синусоиде путем соответствующего подбора отдельных сопротивлений реостата.

Величины последних должны быть такими, чтобы имело место падение напряжения, обуславливающее синусоидальное напряжение на щетках.

Будем считать за исходную точку реостата его середину (нулевое значение напряжения). Тогда при любом положении передвигаемой по коллектору щетки между этой средней точкой и щеткой должна быть разность потенциалов, определяемая выражением:

$$U_p = \frac{U}{2} \sin \alpha, \quad (9)$$

где U — подведенное напряжение постоянного тока, α — угол между средней точкой и некоторым положением щетки.

Мгновенное значение тока в приемнике равно $i_1 = \frac{U}{r} \sin \alpha$. Для того чтобы имело место именно синусоидальное изменение напряжения и силы тока, необходимо наличие следующего равенства:

$$IR_x = \frac{U}{2} - \frac{U}{2} \sin \alpha$$

(здесь мы не учитываем искажающего действия на форму напряжения добавления к току i_2 , постоянно протекающему в реостате, тока приемника i_1 , т. е. считаем $i_2 = I = \frac{U}{R}$ и $i_1 = 0$).

Из полученного выражения можем определить характер изменения сопротивления части реостата в пределах от средней его точки ($\alpha = 0$) до точки присоединения линии питания ($\alpha = 90^\circ$):

$$R_x = \frac{U}{2I} (1 - \sin \alpha). \quad (10)$$

Подбор сопротивления по полученному закону даст на коллекторе весьма близкое к синусоидальному напряжение. Однако, как уже отмечалось, форма кривой напряжения и при реостате с одинаковыми секциями (при достаточном их числе, в частности в ключе Барбье-Бенара) оказывается вполне удовлетворительной.

ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ПО ТИПУ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

30. Принцип действия. Наличие постоянно включенного реостата при работе системы Маругина является весьма неэкономичным. Кроме того, такой реостат представляет собой и довольно громоздкую установку.

Для получения переменного тока любого числа фаз любой периодичности может быть использован обычный генератор постоянного тока, имеющий, как известно, потенциальную кривую коллектора, близкую к синусоиде. При достаточно большом числе коллекторных пластин коллектора генератора постоянного тока многоугольник э. д. с. (рис. 28), индуцированных в отдельных секциях, можно заменить описанным около него кругом, называемым потенциальным кругом или кругом проф. Ossanna. Указанный многоугольник, равно как и потенциальный круг, могут быть построены при наличии в машине синусоидального поля.

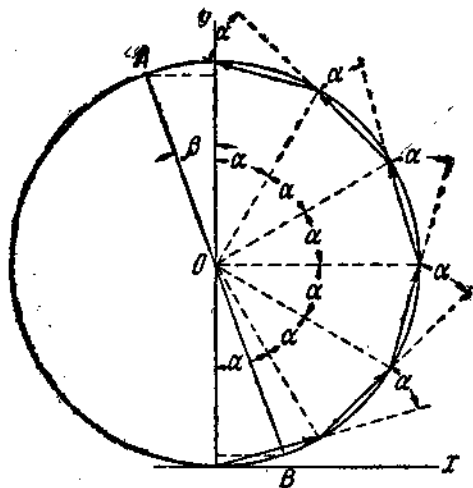


Рис. 28.

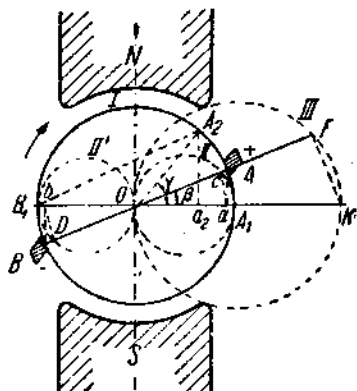


Рис. 29.

В случае двухполюсной машины можно мысленно совместить окружность коллектора с потенциальным кругом. Тогда неподвижные в пространстве точки на коллекторе будут одновременно являться потенциальными точками на круге Ossanna. Максимальное напряжение на коллекторе при холостом ходе получается при диаметрально расположении щеток на геометрической нейтральной (на рис. 28 — ось ординат). Если щетки сдвинуть с последней на некоторый угол β , то э. д. с. между щетками уменьшится и станет равной проекции на ось ординат того диаметра потенциального круга, который составляет с осью ординат угол β .

Если совместить потенциальный круг с коллектором, то следует, для большей наглядности, повернуть его на угол в 90° по направлению вращения часовой стрелки.

На рис. 29 представлен повернутый указанным образом и совмещенный с якорем и коллектором потенциальный круг. Э. д. с. между диаметрально

расположенными щетками для любого сдвига их с геометрической нейтралью определится как проекция на указанную нейтраль диаметра, соединяющего щетки. Например, для положения AB щеток получим:

$$E = \overline{AB} \cos \beta = \overline{ab} = \overline{AB} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) = E_{\max} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right).$$

Величина E для любого положения на коллекторе диаметрально расположенных щеток графически весьма просто может быть определена следующим образом: на радиусах OA_1 и OB_1 потенциального круга I описывают, как на диаметрах, вспомогательные круги II и II' . Тогда э. д. с. между щетками будет равна тому отрезку диаметра, соединяющего щетки в рассматриваемом положении, который заключен между точками пересечения этого диаметра с кругами II и II' . В данном частном случае, изображенном на рис. 29, величина э. д. с. равна

$$E = \overline{AB} \cos \beta = CD.$$

Кроме того, для определения величины E можно построить круг III с центром в точке A_1 и радиусом равным радиусу потенциального круга. Тогда хорда круга III , образуемая продолжением линии, соединяющей сдвинутые щетки, дает для произвольного значения угла β величину э. д. с. E между щетками. Обоснования для обоих изложенных графических методов для нахождения E вытекают из весьма простых тригонометрических соотношений. Действительно, отрезки CD и OF представляют проекции нейтрали A_1B_1 и OK соответственно на диаметр AB и линию BF , что равносильно проекции на нейтраль A_1B_1 диаметра, связывающего щетки.

31. Основные соотношения при синусоидальном поле. Из сказанного выше вытекает, что если по коллектору генератора постоянного тока вращать щетки, то э. д. с. на последних будет изменяться синусоидально. При $\beta = \frac{\pi}{2}$ э. д. с. $E = 0$; при $\beta = \pi$ (щетками поменяются местами) $E = E_{\max}$, как и при $\beta = 0$, но полярность щеток изменится. Таким образом, при повороте щеток на 360° (пространственных при двухполюсной машине и электрических при многополюсной) будем в отдельные моменты вращения иметь

при $\beta = 0$	$E = E_{\max}$
„ $\beta = \frac{\pi}{2}$	$E = 0$
„ $\beta = \pi$	$E = -E_{\max}$
„ $\beta = \frac{3}{2} \pi$	$E = 0$
„ $\beta = 2 \pi$	$E = E_{\max}$

При промежуточных значениях угла β E будет иметь значения, соответствующие значениям э. д. с., меняющейся по синусоиде.

Синусоидальное изменение E с амплитудой равной $E_{\max}$ за один оборот щеток представлено на рис. 30 в зависимости от угла β . Для значений последнего, дающих положительные ординаты кривой, щетка A будет положительной, а для значений угла β , дающих отрицательные ординаты,

щетка A становится отрицательной. Следовательно, за один оборот щеток (при двухполюсной машине) мы имеем на щетках один период синусоидальной э. д. с. Вращая щетки по коллектору с определенной скоростью, мы можем получать однофазный синусоидальный переменный ток любого числа периодов, начиная от нуля. Очевидно, что вращение щеток при этом должно производиться независимо от вращения самого генератора, от-руки

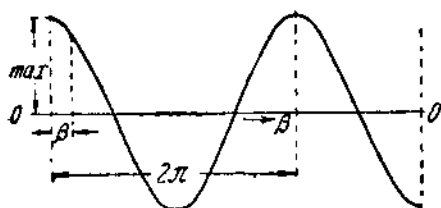


Рис. 30.

или при помощи специального серводвигателя с переменным числом оборотов, в то время как генератор вращается, как обычно, с неизменным числом оборотов. Если на окружности коллектора двухполюсной машины поставить m равномерно распределенных щеток, то получим m -фазную систему переменного тока с синусоидально меняющимся напряжением.

На рис. 31 схематически изображен описываемый источник переменного тока переменной частоты, состоящий из обычного генератора постоянного тока, приводимого во вращение каким-либо первичным двигателем с постоянным числом оборотов, и вращающейся с переменной скоростью траверзы A со щетками a, b, c для получения трехфазного переменного тока переменной частоты.

Траверза A приводится во вращение при помощи, например, рукоятки p . На одном валу с траверзой сидят кольца d, e, f для отведения снимаемого вращающимися щетками переменного тока в управляемую сеть. Каждая из щеток a, b, c соответственно соединена с одним из упомянутых колец d, e, f .

В m -фазной системе щетки уже не будут расположены по диаметру и поэтому максимальное значение E окажется меньше. Кроме того, при вращении щеточной траверзы щетки оказываются сдвинутыми с нейтрали на разные углы, благодаря тому что они не расположены по диаметру.

В этом общем случае э. д. с. между двумя соседними щетками определится на рис. 29 как проекция на нейтраль хорды, соединяющей указанные щетки. Так, например, э. д. с. между щетками, занимающими положение B_1A_2 на рис. 29, будет равна проекции B_1a_2 на геометрическую нейтраль B_1A_1 хорды B_1A_2 .

При трех щетках, расположенных на коллекторе под углом 120° , получим три э. д. с., сдвинутых по фазе на 120° . Мгновенные значения указанных э. д. с. для какого-нибудь определенного положения вращающихся по коллектору щеток могут быть также определены из потенциального круга (рис. 32). Э. д. с. между щетками AC будет равна проекции хорды

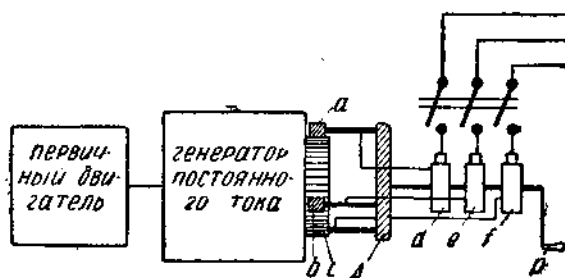


Рис. 31.

АС на нейтраль. Для данного положения АВС щеток, когда щетки А и С отстоят от нейтрали на 30° , хорда расположена параллельно нейтрали и поэтому проекция ее $ac = AC$, что дает максимальное значение э. д. с. E_1 между щетками АС. В этот же самый момент величины э. д. с. E_2 и E_3 между щетками АВ и ВС равны половине э. д. с. E_1 . Проекция хорд АВ и ВС, их соединяющих, соответственно равны ab и bc , причем хорда $ab = bc = \frac{ac}{2} = \frac{AC}{2}$. Направление э. д. с. E_2 и E_3 противоположно, как это явствует из рис. 32, направлению э. д. с. E_1 (сумма всех э. д. с. равна нулю, как в обычной трехфазной системе).

Если мы оставим щетки в отмеченном положении АВС, то они будут снимать с коллектора три неизменных напряжения постоянного тока, соотношение между которыми будет соответствовать определенным мгновенным значениям напряжений трехфазной системы.

В управляемый синхронный двигатель в этом случае будет поступать постоянный ток или, вернее, трехфазный переменный ток с частотой равной нулю, создающий в двигателе магнитное поле, представляющее собой как бы застывшее, остановившееся в пространстве вращающееся магнитное поле. Последнее определенным образом ориентирует в пространстве ротор двигателя, удерживая его в неподвижном положении. Максимум поля будет иметь место, как обычно, посередине катушки, обтекаемой максимальным током. Если повернуть щетки из рассмотренного положения АВС в положение $A_1B_1C_1$, отличающееся от первого на 30° (направление вращения указано на рис. 32 стрелкой), то э. д. с. E_1 (между щетками A_1C_1) уменьшится и будет определяться проекцией a_1c_1 на нейтраль той же хорды A_1C_1 . Проекция хорды A_1B_1 будет равна нулю ($E_2 = 0$), а проекция хорды B_1C_1 окажется равной b_1c_1 ($E_3 = -E_1 = 0,866E_{\max}$). Такое соотношение э. д. с. на щетках как раз и соответствует соотношению э. д. с. в трехфазной системе через 30° после разобранного выше исходного положения.

Максимальное амплитудное значение $E_{\max}$ э. д. с. m -фазной системы переменного тока, полученной путем установки вращающихся по коллектору щеток, может быть определено следующим образом (при синусоидальном поле):

$$E_{\max} = 2r \sin \frac{1}{2} \frac{2\pi}{m} = E_n \sin \frac{\pi}{m}, \quad (11)$$

где $\frac{2\pi}{m}$ — центральный угол в электрических градусах, на который сдвинуты относительно друг друга две соседние щетки m -фазной системы (рис. 32); r — радиус потенциальной окружности; $E_n = 2r$ — э. д. с. постоянного тока при диаметрально расположенных щетках на геометрической нейтрали.

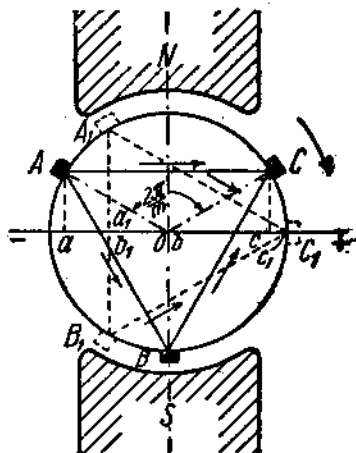


Рис. 32.

Действующее же значение m -фазной э. д. с. будет

$$E = \frac{E_n \sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}}. \quad (12)$$

В частности для трехфазной системы имеем

$$\frac{E}{E_n} = 0,612.$$

При изменении скорости вращения щеток будет изменяться частота снимаемого с коллектора переменного тока. Однако величина напряжения переменного тока окажется неизменной и зависящей лишь от напряжения постоянного тока на коллекторе (последнее зависит от величины возбуждения генератора и числа его оборотов).

Изменение направления вращения щеток (при том же направлении вращения генератора с постоянным числом оборотов) вызовет изменение порядка следования фаз, что повлечет за собой изменение направления вращения управляемых синхронных двигателей. Следует отметить, что при согласном вращении щеток и коллектора будет иметь место относительная скорость между коллектором и щетками, равная разности числа оборотов генератора и щеток в пространстве. В частном случае равенства скоростей щеток и коллектора щетки окажутся в неподвижном положении на коллекторе и тогда генератор постоянного тока по существу превратится в генератор переменного тока с вращающимся якорем и неподвижными полюсами.

В случае же противоположного направления вращения щеток и генератора относительная скорость между коллектором и щетками будет равна сумме скоростей (чисел оборотов) генератора и щеток в пространстве.

Следует отметить, что вращение щеток против направления вращения коллектора дает значительно худшую коммутацию, чем в первом случае.

И в том и другом случае частота получаемого на щетках переменного тока будет зависеть исключительно от числа оборотов щеток, число же оборотов генератора будет сказываться лишь на величине напряжения (постоянного и переменного тока).

32. Потенциальная кривая коллектора при несинусоидальном поле. Перейдем теперь к вопросу о потенциальной кривой коллектора при несинусоидальном поле.

В каждой секции обмотки якоря индуктируется э. д. с., повторяющая по форме своей кривой кривую распределения индукции под полюсом. Если имеем, например, кривую индукции I (рис. 33), то эта же кривая в соответственно измененном масштабе ординат представляет собой кривую индуктированной в секции э. д. с.

Допустим, что одна щетка стоит на геометрической нейтральной, а другая на расстоянии x от нее. Э. д. с. между ними является суммой ординат кривой I , проведенных над каждой из секций, лежащих в промежутке $A_1 - x$:

$$E_x = \sum_{i=0}^{i=x} 2 w_s \cdot l \cdot v \cdot B_i = 2 w_s \cdot l \cdot v \cdot \sum_{i=0}^{i=x} B_i,$$

где w_s — число витков в одной секции, l — активная длина проводника, v — линейная скорость движения проводника. При достаточно большом числе секций сумма превращается в площадь (на рис. 33 заштрихована).

На основании этого можно написать

$$E_x \cong 2w_s \cdot l \cdot v \int_{x=0}^{l-x} B_1 dx. \quad (13)$$

Следовательно, потенциальная кривая по коллектору является интегральной кривой поля, умножаемой на постоянный множитель $2w_s \cdot l \cdot v$.

Потенциальная кривая коллектора при холостом ходе даже в случае, когда кривая поля значительно отступает от синусоиды, все же имеет форму близкую к синусоиде. Это обстоятельство наглядно иллюстрирует рис. 34, на котором представлены кривые двух сдвинутых по фазе э. д. с. e_1 и e_2 , двух последовательно соединенных секций и суммарная кривая e_0 результирующей э. д. с.

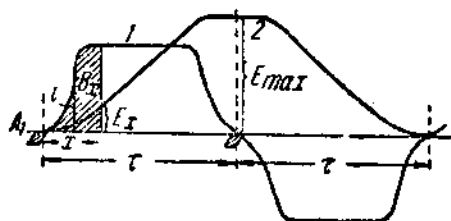


Рис. 33.

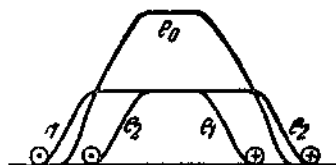


Рис. 34.

Потенциальная кривая на коллекторе при поле почти прямоугольной формы имеет вид кривой 2, представленной на рис. 33.

При нагрузке рассматриваемого источника переменной частоты, вследствие реакции якоря, распределение поля оказывается искаженным, причем максимум поля сдвинется в направлении вращения машины.

В соответствии с этим получит искажение и потенциальная кривая коллектора.

33. Соотношение между первичной и вторичной электродвижущими силами. Соотношения между э. д. с. постоянного тока и действующим значением э. д. с. получаемого переменного тока при различных распределениях индукции под полюсом для разного числа фаз представлены на приводимой ниже табл. III.

ТАБЛИЦА III.

$\alpha = \frac{b_0}{\tau}$	Однофазный ток	Трехфазный ток	Шестифазный ток
0,75	0,69	0,6	0,347
синус	$\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$	$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 0,612$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} = 0,364$
0,6	0,75	0,66	0,377

Форма поля здесь поставлена в зависимость от величины α , представляющей собой отношение теоретической полюсной дуги b_0 к полюсному делению τ .

34. Коммутация. При вращении щеток по коллектору они последовательно проходят участки с различными значениями индукции, благодаря чему в некоторые моменты оборота коммутация получается весьма неблагоприятной, влекущей за собой искрение на коллекторе. В частности при трехфазной системе максимум тока под щеткой имеет место, когда последняя расположена в зоне довольно сильного поля (рис. 32). Это обстоятельство вызывает необходимость принятия каких-либо иных мер для уменьшения искрения по сравнению с мерами, имеющими место в обычной машине постоянного тока (добавочные полюса не могут быть применены благодаря вращающимся щеткам).

Единственно радикальной мерой является снижение снимаемой с коллектора мощности, что влечет за собой использование машины лишь на $50 \div 60\%$.

ГЛАВА VIII.

ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ПО ТИПУ ОДНОЯКОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.

1. ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЩЕТКАМИ.

35. Вводные замечания. Применяемые и возможные к применению в схемах синхронной связи источники переменной частоты по типу одноякорных преобразователей можно разделить на преобразователи с вращающимися щетками и преобразователи с неподвижными щетками. Действие

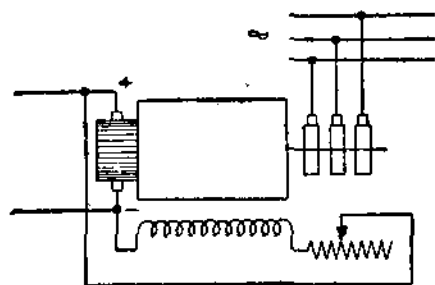


Рис. 35.

всех этих преобразователей основано на общем принципе работы одноякорного преобразователя.

36. Одноякорный преобразователь переменного тока в переменный ток другой частоты. Этого рода преобразователь представляет собой по существу одноякорный преобразователь переменного тока в постоянный, но с вращающимися щетками.

Нормальный одноякорный преобразователь переменного тока в по-

стоянный представляет собой со стороны переменного тока синхронный двигатель, а со стороны постоянного тока генератор постоянного тока (рис. 35).

Соотношения токов и напряжений в одноякорном преобразователе, как известно, при пренебрежении потерями в нем и наличии синусоидального поля могут быть выражены следующим образом:

Для амплитуды m_1 -фазного напряжения

$$U_{m1} = 2r \sin \frac{1}{2} \frac{2\pi}{m_1} = U_n \sin \frac{\pi}{m_1}, \quad (14)$$

где $\frac{2\pi}{m_1}$ — центральный угол m_1 -угольника, r — радиус потенциального круга, m_1 — число фаз подведенного напряжения, U_{m1} — амплитуда m_1 -фазного напряжения, U_n — напряжение постоянного тока при диаметрально расположенных щетках, находящихся на геометрической нейтрали. Ранее, при рассмотрении источника переменной частоты по типу генератора постоянного тока (рис. 32), было установлено, что максимальное значение напряжения постоянного тока при нескольких равномерно распределенных щетках по коллектору двухполюсной машины равно:

$$U_m \cong E_m = E_n \sin \frac{\pi}{m}.$$

Обозначим число щеток на коллекторе (соответственно и число фаз) через m_2 , в отличие от числа фаз питающего преобразователь переменного тока.

Тогда предыдущее выражение можно написать так:

$$U_{m_2} = 2r \sin \frac{\pi}{m_2}. \quad (15)$$

Если щетки привести во вращение по коллектору с некоторой скоростью, то мы получим на них m_2 -фазное напряжение переменного тока с частотой, соответствующей числу оборотов щеточной траверзы, а именно $f_2 \cong \frac{n}{60}$ при двухполюсной машине и $f_2 = \frac{pn}{60}$ в машине с p парами полюсов.

Амплитуда получаемой на щетках синусоидальной э. д. с. окажется равной

$$U_{m_2} = 2r \sin \frac{\pi}{m_2},$$

что следует из рис. 32.

Тогда отношение снимаемого напряжения к подведенному будет равно

$$\frac{U_{m_1}}{U_{m_2}} = \frac{\sin \frac{\pi}{m_1}}{\sin \frac{\pi}{m_2}};$$

при $m_1 = m_2$, например $m_1 = m_2 = 3$, это отношение превращается в единицу, т. е. $U_{m_1} = U_{m_2}$ при пренебрежении падением напряжения в машине, что является вполне допустимым, так как в якоре преобразователя протекает разность токов двигательного и генераторного режимов.

Как видно из приведенных соотношений, величины U_{m_1} и U_{m_2} , как и в обычном одноякорном преобразователе, между собой жестко связаны. Для изменения напряжения преобразованного тока (постоянного или переменного с частотой f_2) необходимо изменить подведенное к кольцам напряжение U_{m_1} .

Изменение возбуждения преобразователя, в отличие от генератора постоянного тока, практически не будет вызывать изменение напряжения на коллекторе и, в отличие от двигателя постоянного тока, не изменит, конечно, числа оборотов преобразователя (синхронный двигатель), а обусловит лишь изменение $\cos \varphi_1$, при котором в преобразователь будет

поступать энергия из сети переменного тока. В действительности некоторое (весьма небольшое) изменение напряжения будет иметь место за счет изменения падения напряжения в якоре преобразователя при изменении величины тока с изменением $\cos \varphi_1$.

Таким образом, на коллекторе мы можем получить напряжение, неизменное по амплитуде и меняющееся по частоте, зависящей от скорости вращения щеток. При неподвижных щетках имеем напряжение постоянного тока, причем максимальная величина этого напряжения равна амплитудному значению напряжения переменного тока при вращающихся щетках. Следует отметить, что при любой частоте переменного тока, получаемой на вращающихся щетках, поле реакции якоря будет неподвижно относительно основного поля, т. е. поля индукторов, а следовательно неподвижно и в пространстве, так как одноякорные преобразователи строятся с неподвижной магнитной системой и вращающимся якорем.

Если выполнить преобразователь с вращающейся магнитной системой и неподвижным якорем (по типу нормального синхронного двигателя), то коллектор будет неподвижен и тогда при неподвижных щетках на коллекторе будем получать переменный ток частоты, равной частоте питающей преобразователь сети. Для получения же постоянного тока надлежит вращать щетки синхронно с ротором в сторону вращения последнего. Тогда щетки окажутся неподвижными относительно поля машины и будут поэтому находиться под неизменным напряжением, как и в машине постоянного тока. При вращении щеток в сторону, обратную вращению поля индукторов, получим большую частоту по сравнению с частотой питающей преобразователь сети. Для получения на щетках переменного напряжения с обратным порядком следования фаз надлежит вращать щетки со скоростью выше синхронной в сторону вращения поля индукторов.

Соотношения частот первичной и вторичной (частота на щетках) для различных характерных значений числа оборотов щеток и направления их вращения могут быть сведены в таблицу.

На основании разобранных выше можем для преобразователя с неподвижным коллектором написать:

$$f_2 = f_1 \mp f_n.$$

Здесь f_n представляет собой частоту, соответствующую механическому вращению щеток, равную $f_n = \frac{pn}{60}$, где n — число оборотов щеток. Знак минус надлежит брать при согласном вращении щеток и поля индукторов, а знак плюс — при их вращении в противоположные стороны. При неподвижных индукторах и вращающемся коллекторе имеем:

$$f_2 = f_n = \frac{pn}{60}.$$

На табл. IV даны указанные выше соотношения.

В табл. IV n_1 — число оборотов вращающегося магнитного поля, f_1 — частота питающего преобразователь тока. Стрелки в графе „порядок следования фаз“ указывают, получается ли порядок следования фаз согласным с порядком следования фаз первичной системы, находящимся в соответствии с направлением вращения поля, или ему противоположным.

В преобразователе с неподвижной магнитной системой вращающееся поле якоря движется по якору со скоростью, соответствующей частоте f_1

ТАБЛИЦА IV.

Направ- ление вращения поля	Вращение щеток		Преобразователь с неподвижн. коллект.		Преобразователь с вра- щающимся коллект.	
	направл. вращения	скорость	частота на щетках	порядок следов. фаз	частота на щетках	порядок следов. фаз
↻	0	0	$f_2 = f_1$	↻	$f_2 = 0$	—
	↻	$n < n_1$	$f_2 = f_1 - f_n$	↻	$f_2 = f_n$	↻
		$n = n_1$	$f_2 = 0$	—	$f_2 = f_1$	↻
		$n > n_1$	$f_2 = f_1 - f_n$	↻	$f_2 > f_1$	↻
	↻	$n \neq n_1$	$f_2 = f_1 + f_n$	↻	$f_2 = f_n$	↻
		$n = n_1$	$f_2 = 2f_1$	↻	$f_2 = f_1$	↻

питающего тока, т. е. с синхронным числом оборотов. Вращаясь по якору, оно стремится увлечь за собой с этой же скоростью магнитную систему.

Вследствие того, что последняя выполнена неподвижной, от взаимодействия поля якоря и полюсной системы якорь вращается с синхронным числом оборотов в сторону, противоположную вращению поля по якору, благодаря чему вращающееся поле подобного синхронного двигателя оказывается неподвижным в пространстве.

В случае же преобразователя с вращающейся магнитной системой и неподвижным коллектором вращающееся поле будет увлекать магнитную систему в сторону своего вращения и, следовательно, окажется в пространстве вращающимся с синхронной скоростью.

Таким образом, при одних и тех же порядках следования фаз в питающей сети переменного тока и направлении вращения поля якоря роторы преобразователей двух рассматриваемых типов будут вращаться в противоположные стороны (в одном случае ротором является якорь, а в другом — магнитная система). Кроме того, в первом случае магнитное поле машины в пространстве неподвижно, а во втором — вращается с синхронной скоростью. Поэтому в одноякорном преобразователе с неподвижным полем в пространстве постоянный ток на щетках будет иметь место при неподвижных же щетках. Наоборот, в преобразователе с вращающимся полем в пространстве постоянный ток можно получить лишь при синхронной скорости вращения щеток в сторону вращения поля. Следует отметить, что и в том и в другом случае частота переменного тока на щетках будет определяться относительной скоростью вращения поля и щеток. Если щетки и поле взаимно неподвижны, то на щетках может возникнуть лишь постоянный ток.

При любой частоте на щетках, т. е. при любой скорости их вращения, частота тока в якоре будет равна частоте питающего преобразователь тока, которая определяет как скорость вращения поля, так и скорость вращения

одноякорного преобразователя, работающего с этой стороны как синхронный двигатель.

Теперь надлежит установить соотношения между величинами преобразованного переменного тока с частотой f_2 и питающего преобразователь переменного тока с частотой f_1 . Если пренебречь потерями в преобразователе, то можно сказать, что мощность, подводимая к преобразователю в виде переменного тока одной частоты, целиком преобразуется в мощность в виде переменного тока другой частоты.

Поэтому можем написать $P_1 = P_2$ или

$$m_1 U_{\Phi_1} I_{\Phi_1} \cos \varphi_1 = m_2 U_{\Phi_2} I_{\Phi_2} \cos \varphi_2. \quad (16)$$

Так как обмотка якоря соединена в многоугольник, то

$$U_{\Phi_1} = U_1; U_{\Phi_2} = U_2,$$

где U_1 и U_2 — соответственно напряжения на кольцах и щетках.

Отсюда можем написать:

$$\frac{I_{\Phi_1}}{I_{\Phi_2}} = \frac{m_2 U_2 \cos \varphi_2}{m_1 U_1 \cos \varphi_1}.$$

Ранее было получено, что отношение

$$\frac{U_{m_1}}{U_{m_2}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sin \frac{\pi}{m_1}}{\sin \frac{\pi}{m_2}}.$$

Тогда можем написать

$$\frac{I_{\Phi_1}}{I_{\Phi_2}} = \frac{m_2 \sin \frac{\pi}{m_2} \cos \varphi_2}{m_1 \sin \frac{\pi}{m_1} \cos \varphi_1}.$$

Зная, что у многофазной системы линейный ток

$$I_A = I_{\Phi} \cdot 2 \sin \frac{\pi}{m},$$

в нашем случае можем написать

$$I_{A_1} = I_{1\Phi} \cdot 2 \sin \frac{\pi}{m_1}; \quad (17)$$

$$I_{A_2} = I_{2\Phi} \cdot 2 \sin \frac{\pi}{m_2}. \quad (18)$$

Перейдем теперь к соотношению линейных токов одноякорного преобразователя переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты.

Используя приведенные выше отношения, можем написать

$$\frac{I_{A_1}}{I_{A_2}} = \left(\frac{I_{1\Phi}}{I_{2\Phi}} \right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{m_1}}{\sin \frac{\pi}{m_2}}.$$

Подставляя вместо $\frac{I_{1\Phi}}{I_{2\Phi}}$ найденное значение, получим:

$$\frac{I_{A_1}}{I_{A_2}} = \frac{m_2 \cdot \cos \varphi_2}{m_1 \cdot \cos \varphi_1}.$$

При $m_2 = m_1$ и $\cos \varphi_2 = \cos \varphi_1$ линейные токи I_{A_1} и I_{A_2} равны между собой.

На самом деле подобного равенства не будет, так как для вращения преобразователя необходимо наличие в якоре тока холостого хода. Выведенные выше соотношения справедливы лишь при пренебрежении потерями в преобразователе. Поэтому в действительности в рассматриваемом случае $I_{A_1} > I_{A_2}$ (в якоре преобразователя будет действовать разность токов). При переменной скорости вращения управляемых двигателей, если в приемнике не производится соответственной регулировки, $\cos \varphi_2$ имеет переменное значение, причем при скорости щеток, близкой к нулю в преобразователе с вращающимся коллектором и близкой к синхронной в преобразователе с неподвижным коллектором $\cos \varphi_2 \cong 1$, так как частота $f_2 \cong 0$. Если со щеток снимается постоянный ток, то соотношение между действующим значением переменного тока и максимальным значением постоянного тока в соответствующей щетке будет иметь вид:

$$\frac{I_{A_1}}{I_{A_2}} = \frac{m_2 \sqrt{2}}{m_1 \cos \varphi_1}.$$

В случае двух щеток на коллекторе для получения однофазного переменного тока соотношение между линейными токами $\frac{I_{A_1}}{I_{A_2}}$ примет вид:

$$\frac{I_{A_1}}{I_{A_2}} = \frac{2 \cos \varphi_2}{m_1 \cos \varphi_1}.$$

Здесь вместо m_2 подставлено значение $m_2 = 2$ при однофазном токе π по следующим соображениям.

Как известно, амплитуда m -фазного напряжения, выраженная через радиус потенциального круга, равна

$$U_m = 2r \sin \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{m},$$

где $\frac{2\pi}{m}$ — центральный угол m -угольника. При однофазном токе угол $\frac{2\pi}{m}$ должен равняться 180° , т. е. $m = 2$; тогда

$$U_m = 2r \sin \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{2} = 2r,$$

т. е. равно диаметру потенциального круга, что в действительности и имеет место.

Если диаметрально расположенные щетки помещены на геометрической нейтральной, то тогда получаем обычный одноякорный преобразователь переменного тока в постоянный, причем отношение действующего значения переменного тока, питающего преобразователь, к постоянному току, отво-

димому щетками, превратится в известное выражение для соотношения токов в одноякорном преобразователе переменного тока в постоянный

$$\frac{I_{A_1}}{I_n} = \frac{2\sqrt{2}}{m_1 \cos \varphi_1}. \quad (19)$$

В случае одноякорного преобразователя с неподвижным коллектором и преобразования переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты щетки необходимо приводить во вращение от специального двигателя с широкой регулировкой скорости. Необходимость в роторе отпадает и преобразователь может быть выполнен как неподвижный якорь без отдельной магнитной системы, присоединенной к неподвижному коллектору с вращающимися щетками. Подводимый в m точках обмотки якоря, заложенной глубоко в пазы, m -фазный переменный ток создаст вращающееся магнитное поле, индуктирующее в обмотке якоря переменную э. д. с., которая действует на пластинах коллектора. Частота этой э. д. с. равна частоте питающего тока. Частота же э. д. с., получаемой на щетках, зависит от скорости вращения последних (об этом см. подробнее табл. IV).

Очевидно, что во всех указанных выше одноякорных преобразователях для получения различных первичного и вторичного напряжений могут быть применены на якоре две трансформаторно связанные обмотки, из которых одна соединена с кольцами или первичным коллектором, а другая — со вторичным коллектором.

37. Одноякорный преобразователь постоянного тока в переменный с вращающимся коллектором. В случае наличия сети постоянного тока в качестве ключа — источника переменного тока переменной частоты может быть применен одноякорный преобразователь, выполненный по типу шунтового двигателя постоянного тока.

Схема подобного преобразователя изображена на рис. 36. Преобразователь представляет собой двигатель постоянного тока с несколько удлиненным коллектором, на котором установлены два комплекта щеток a, b и c, d, e , из которых комплект a, b установлен неподвижно, а комплект c, d, e выполнен вращающимся. Преобразователь приключен щетками a, b и обмоткой возбуждения к сети постоянного тока и работает вхолостую, как нормальный двигатель постоянного тока. Второй комплект щеток c, d, e предназначен для снятия переменного, в данном случае трехфазного тока. Если щетки неподвижны, то они окажутся под некоторым постоянным напряжением, как это имеет место, например, в одноякорном преобразователе переменного тока в переменный другой частоты с вращающимся коллектором. Распределение потенциала по коллектору преобразователя такое же, как и в генераторе постоянного тока, т. е. близкое к синусоидальному (рис. 30 и 33).

Как и в обычном одноякорном преобразователе, распределение потенциала по коллектору обуславливается обратной э. д. с. якоря преобразователя. Таким же образом в обмотке якоря данного преобразователя действует разность токов двигательного и генераторного режимов, достаточная для создания вращающего момента для вращения машины вхолостую. Очевидно, что частота снимаемого переменного тока зависит только от скорости вращения щеток c, d, e и не зависит от числа оборотов самого преобразователя. Соотношения напряжений в последнем, при пренебрежении паде-

нием напряжения в якоре, подобны соотношениям, установленным для источника переменного тока переменной частоты, выполненного по типу генератора постоянного тока (см. табл. III). Соотношения же постоянного и переменного токов при пренебрежении потерями в преобразователе соответствуют соотношению между этими величинами, имеющему место для одноякорного преобразователя переменного тока в постоянный. При расчете нужно учитывать возможность разбоя преобразователя при плохом $\cos \varphi$ приемника благодаря размагничивающему действию реакции якоря на основное поле. Приведенные выше, равно как и рассматриваемый, источники переменной частоты по типу машины постоянного тока и одноякорных преобразователей обладают одним общим недостатком, заключающимся в том, что в передатчике (командном устройстве) приходится иметь или постоянно вращающуюся машину или постоянно вращающиеся щетки, если даже ключ и не производит управления, но готов к действию, т. е. со щеток в управляемую систему поступает постоянный ток ($f_2 = 0$). Это обстоятельство создает известные неудобства. Для устранения их можно применить отдельный ключ-коллектор, электрически соединенный с коллектором преобразо-

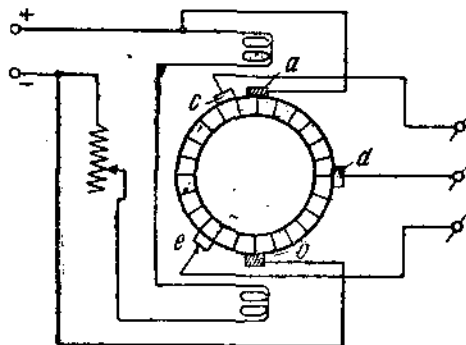


Рис. 36.

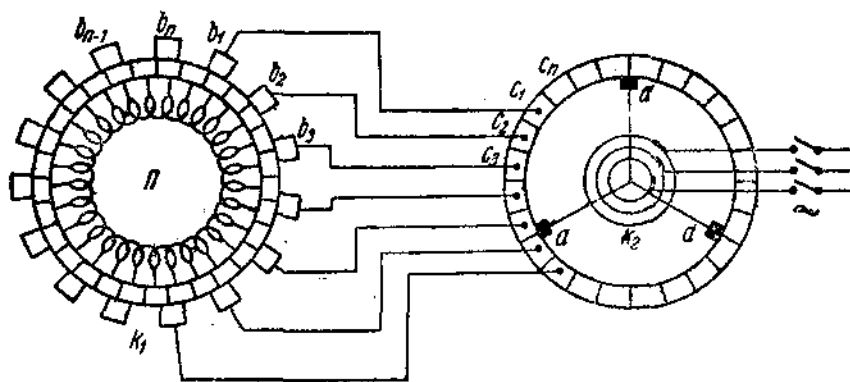


Рис. 37.

вателя. Схема включения такого отдельного ключа применительно к рассмотренному выше одноякорному преобразователю постоянного тока в переменный изображена на рис. 37.

На коллекторе K_1 одноякорного преобразователя Π установлен ряд неподвижных щеток $b_1, b_2, \dots, b_n$, числом в p раз меньшим, чем число пластин коллектора K_1 . Указанные щетки соединены отдельными проводами с пластинами $c_1, c_2, \dots, c_n$ неподвижного коллектора K_2 , расположенного в центральном приборе. Число пластин коллектора K_2 равно числу

неподвижных щеток $b_1, b_2 \dots b_n$ и в p раз меньше числа пластин коллектора K_1 . Благодаря такому соединению пластины коллектора K_2 будут находиться под неизменными потенциалами, соответствующими расположению на коллекторе K_1 щеток $b_1, b_2 \dots b_n$ и меняющимися по окружности по закону, близкому к синусоидальному распределению напряжения.

Если на коллекторе K_2 расположить m вращающихся на общей траверзе щеток под углом друг к другу, равным $\frac{2\pi}{m}$, то получим m -фазный переменный ток, отводимый через кольца в управляемую линию. По рис. 37 на коллекторе K_2 установлены три щетки для получения трехфазного тока. Такое устройство весьма облегчает конструкцию командного поста, так как позволяет на нем расположить лишь небольшой коллектор. Однако благодаря этому приходится применять вместо одного два коллектора (один из них с большим количеством щеток) и многожильный кабель для соединения их. Число жил кабеля стоит в тесной связи с желаемой степенью

приближения получаемого на щетках d напряжения к синусоидальной форме.

Для получения кривой, достаточно близкой к синусоиде, необходимо установить на коллекторе K_1 не менее $12 \div 18$ щеток, что дает довольно большой кабель, затрудняющий ремонт при обрывах какой-либо из жил.

Число жил кабеля, приходящихся на каждые 180 электрических градусов коллектора, может быть уменьшено на половину в случае симметрии кривой поля машины относительно вертикальной линии, проходящей посередине между двумя нулевыми значениями кривой поля.

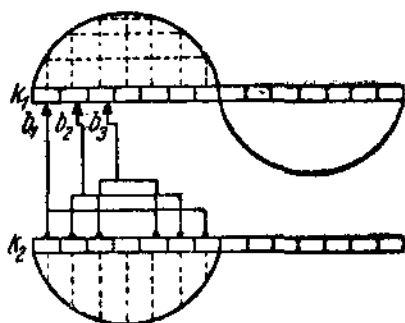


Рис. 38.

Подводимый от каждой щетки $b_1, b_2 \dots$ потенциал можно сообщить двум симметрично расположенным коллекторным пластинам, как это изображено на рис. 38. Тогда каждым двум пластинам коллектора K_2 будет соответствовать одна жила кабеля. Подобным же образом могут быть соединены между собой щетки на коллекторе K_1 , или можно поставить половинное число щеток.

Во всех источниках переменной частоты с вращающимися щетками со скоростью, отличной от скорости вращения магнитного поля машины в пространстве, условия коммутации получаются довольно неблагоприятными, так как щетки последовательно проходят участки магнитного поля с различной индукцией. Поэтому для уменьшения искрения приходится идти на неполное использование машины.

Наличие вращающихся щеток вообще является неблагоприятным фактором в системах рассматриваемого типа. Электрический контакт получается более надежным при неподвижных щетках и вращающемся коллекторе, так как при вращающихся щетках трудно получить надежную и вместе с тем достаточно легкую конструкцию вращающейся щеточной траверзы.

38. Одноякорный преобразователь постоянного тока в переменный с неподвижным коллектором. Как уже отмечалось, в случае применения неподвижного коллектора в одноякорном преобразователе

переменного тока постоянной частоты в переменный ток меняющейся частоты необходимость в роторе отпадает, так как вращающуюся траверзу со щетками приходится приводить, с целью получения различного числа оборотов, от отдельного серводвигателя. Если бы мы имели одноякорный преобразователь с неизменным соотношением частот, то привод щеточной траверзы можно было бы осуществить или от специального синхронного двигателя или же выполнить одноякорный преобразователь с ротором для вращения щеточной траверзы.

Одноякорный преобразователь постоянного тока в переменный меняющейся частоты изображен на рис. 39. Подобный преобразователь применяется фирмой Виккерса по предложению инж. Япольского в качестве ключа для синхронной передачи в схеме с меняющейся частотой и синхронными двигателями. Преобразователь представляет собой неподвижный якорь (по типу якоря машин постоянного тока) с обмоткой S , помещенной в железный сердечник y , служащий для проведения магнитного потока по железу (без воздушных зазоров). Обмотка S соединена с коллектором, на котором установлены диаметрально расположенные вращающиеся щетки a, b , соединенные с питающей линией постоянного тока. Если предполагается получить от преобразователя трехфазный переменный ток (как обычно и бывает), то трехфазная линия управления присоединяется к обмотке S преобразователя в трех точках, сдвинутых друг относительно друга на 120° .

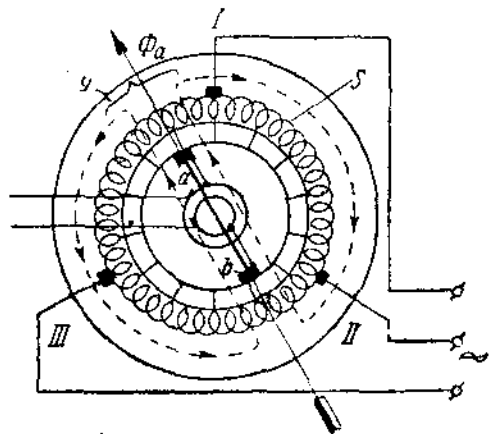


Рис. 39.

При покое щеток в сердечнике имеет место неподвижный поток Φ_a , создаваемый постоянным током, обтекающим обмотку, и совпадающий своей осью с осью щеток a, b . При вращении последних вместе с осью щеток будет перемещаться и ось потока Φ_a , т. е. возникает вращающийся магнитный поток, который создает в каждой фазе обмотки обратную э. д. с., величина которой будет равна

$$E_\phi = 4,44 k_w \frac{pn}{60} \omega_\phi \Phi_a 10^{-8} \text{ В},$$

если считать, что поток Φ_a распределен синусоидально (здесь k_w — обмоточный коэффициент, ω_ϕ — число витков на фазу). Указанная трехфазная э. д. с. E_ϕ будет действовать в трехфазной цепи I-II-III. Частота ее определится числом оборотов щеток ($f = \frac{pn}{60}$). При изменении частоты обратно пропорционально ей будет изменяться поток Φ_a , если пренебречь изменением падения напряжения в обмотке S . Соотношения токов в приемнике и обмотке при неподвижных щетках или при скорости их вращения близкой к нулю будут подобны соотношениям, установленным для ключа системы Маругина (рис. 17, 18), так как в этих условиях обратная э. д. с. будет равна нулю и обмотка якоря превратится в реостат с активным сопро-

тивлением, присоединенным к коллектору. Таким образом, по существу, при покое щеток якорь преобразователя окажется в режиме короткого замыкания. Это обстоятельство выдвигает требование достаточного активного сопротивления обмотки якоря, что соответственно обуславливает увеличение по сравнению с машиной постоянного тока потерь в меди якоря преобразователя.

Кроме того, необходимо в большинстве случаев производить регулирование подведенного к преобразователю напряжения постоянного тока, изменяя его примерно пропорционально частоте управления, т. е. скорости щеток.

II. ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ С НЕПОДВИЖНЫМИ ЩЕТКАМИ.

Эти источники переменной частоты отличаются от изложенных выше тем, что щетки установлены неподвижно на коллекторе, вращающемся, для получения различных значений частоты, с переменной скоростью. Источники с вращающимися щетками имеют

число оборотов коллектора и якоря или неизменным или равным нулю. Если скорость якоря и была бы изменена, то это не сказалось бы никоим образом на частоте преобразованного тока.

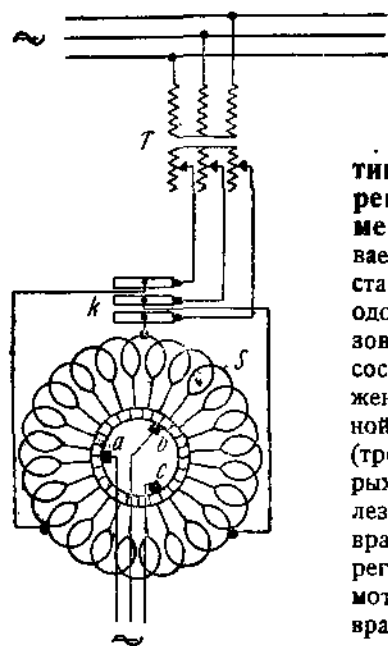


Рис. 40.

39. Источники переменной частоты по типу одноякорного преобразователя переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты. Рассматриваемый источник переменной частоты представляет собой преобразователь числа периодов, выполненный как одноякорный преобразователь переменного тока в постоянный. Он состоит (рис. 40), во-первых, из ротора, снабженного обмоткой постоянного тока, соединенной с коллектором и контактными кольцами K (три в случае трехфазного тока), и, во-вторых, статора, выполненного из листового железа. Так как преобразователь приводится во вращение от специального двигателя с широкой регулировкой скорости, то статор не несет обмотки возбуждения (т. е. не имеет собственного вращающего момента) и может быть или вовсе лишен обмоток или снабжен обмотками дополнительных полюсов. Таким образом, в основном он служит магнитной цепью для вращающегося

потока преобразователя. Преобразователь при отсутствии дополнительных полюсов может и не иметь статора. В таком случае ротор должен быть выполнен с глубоко расположенными в железе пазами, как это показано на рис. 41. Роль железа статора для замыкания магнитного потока выполняет здесь железный слой, расположенный над пазами ротора.

Кольца K могут быть присоединены к сети переменного тока через регулируемый трансформатор T , что позволяет изменять напряжение на кольцах, а следовательно и на коллекторе. Если присоединить к сети перемен-

ного тока с частотой f_1 кольца или коллектор неподвижного преобразователя, то напряжение U_1 этой сети вызовет в обмотке преобразователя намагничивающий ток, создающий вращающийся магнитный поток, пересекающий проводники обмотки с числом оборотов $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$ об/мин, где p — число пар полюсов преобразователя.

Указанный поток будет индуцировать в обмотке преобразователя обратную э. д. с. E_2 , действующую между щетками коллектора, причем периодичность ее будет равна f_1 . Если преобразователь привести во вращение с числом оборотов n в сторону, противоположную вращению магнитного потока по якорю, то поток, продолжая вращаться по якорю преобразователя с той же скоростью n_1 в пространстве, т. е. относительно неподвижных щеток, будет делать меньше оборотов, причем число их окажется равным разности оборотов поля якоря по якорю и оборотов самого якоря.

Благодаря этому и число периодов f_2 напряжения на коллекторе будет меньше частоты f_1 сети:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60}.$$

В частности при $n = n_1$ частота f_2 окажется равной нулю, т. е. с коллектора будет поступать постоянный ток, устанавливающий в неизменном положении роторы управляемых синхронных двигателей. Поле преобразователя в этом случае окажется неподвижным в пространстве, т. е. относительно щеток на коллекторе. Таким образом путем изменения скорости вращения преобразователя можно получить на коллекторе любое число периодов f_2 .

При вращении ротора в сторону, обратную вращению поля преобразователя, со скоростью большей, чем скорость поля, т. е. при $n > n_1$, поле будет вращаться в пространстве в сторону, обратную его вращению в пространстве при $n < n_1$. Это обстоятельство вызовет изменение порядка следования фаз по сравнению с первым случаем, что обусловит изменение направления вращения управляемых синхронных двигателей. При согласном вращении преобразователя и его поля частота на коллекторе окажется равной:

$$f_2 = \frac{p(n_1 + n)}{60}.$$

Как уже отмечалось при рассмотрении одноякорного преобразователя переменного тока в переменный другой частоты с вращающимися щетками, отношение напряжений подведенного и снимаемого равно:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sin \frac{\pi}{m_1}}{\sin \frac{\pi}{m_2}}.$$

При $m_1 = m_2$ имеем $U_1 = U_2$. Подобное соотношение будет иметь место и в данном случае. Таким образом, при любом изменении скорости преобразователя изменяется лишь f_2 ; эффективные (равно как и максимальные)

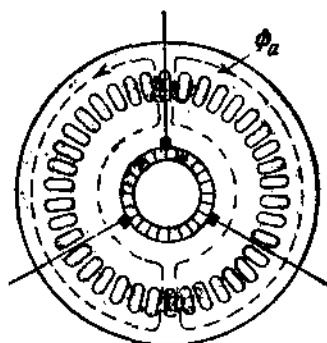


Рис. 41.

значения вторичного и первичного напряжений U_1 и U_2 при $m_1 = m_2$ будут равны между собой (вернее — U_2 будет отличаться от U_1 на небольшую величину падения напряжения в обмотке преобразователя). При замкнутой вторичной цепи рассматриваемого источника переменной частоты в первичной его цепи будет иметь место ток I_1 частоты f_1 , а во вторичной возникает ток I_2 частоты f_2 , эффективные их значения будут отличаться друг от друга лишь на сравнительно небольшую величину намагничивающего тока, как и в обычном трансформаторе со вторичной обмоткой, приведенной к первичной. Значение намагничивающего тока будет особенно невелико в случае выполнения преобразователя по рис. 41, так как при этой конструкции отсутствует междужелезное пространство.

Следовательно, в обмотке преобразователя будет протекать разность двух токов почти одинаковой величины, но различной частоты. В частном случае при снятии со щеток постоянного тока (преобразователь переменного тока в постоянный) в обмотке будет действовать разность между постоянным и переменным токами (равнодействующий ток). Для каждого витка будет иметь место своя кривая равнодействующего тока, отличная от кривых соседних витков. Это объясняется тем, что витки обмотки проходят над щетками в разное время, в силу чего для каждого витка будет свой сдвиг по фазе вторичного тока относительно первичного.

В отличие от одноакторного преобразователя переменного тока в постоянный с возбуждением постоянным током, — в рассматриваемом преобразователе $\cos \varphi_1$ (сдвиг между токами I_1 и напряжением U_1) будет зависеть от $\cos \varphi_2$ (сдвиг между током I_2 и U_2) и величины намагничивающего тока, аналогично тому, как это имеет место в обычном трансформаторе. Преобразователь же с возбуждением постоянным током представляет собой синхронный двигатель, в котором $\cos \varphi_1$ может быть установлен по желанию соответственным возбуждением.

Потери на нагревание обмотки преобразователя меньше, чем те, которые соответствуют одному преобразуемому току. В соответствии с этим преобразователи частоты (как все одноакторные преобразователи с одной общей обмоткой на якоре) отличаются довольно высоким коэффициентом полевого действия (в среднем 80–90%). Наличие неподвижных щеток позволяет создать благоприятные условия для коммутации при помощи дополнительных полюсов.

Как известно,¹ коммутация тока во всех коллекторных машинах переменного тока протекает при участии двух э. д. с.: трансформаторной э. д. с. и реактивной э. д. с.

Трансформаторная э. д. с. индуцируется в короткозамкнутой секции вращающимся магнитным полем и может быть выражена следующим образом:

$$e_t = 4,44 s f_1 w_k \Phi \cdot 10^{-8} \text{ В}, \quad (20)$$

где s — скольжение вращающегося поля относительно обмотки якоря, а w_k — число витков в короткозамкнутой секции.

В случае включения коллекторной машины по схеме рис. 40, т. е. при питании с ротора, скорость вращения магнитного потока относительно обмотки ротора преобразователя при неизменности частоты остается также

¹ См. К. И. Шенфер, Коллекторные двигатели переменного тока, 1931 г., стр. 28–38 и 133–141.

неизменной и поэтому величина трансформаторной э. д. с. не зависит от скорости вращения якоря и частота ее равна частоте сети f_1 (в этом случае $s = 1$). Величина указанной э. д. с. не зависит от того, снимается ли с коллектора ток или нет, и обусловлена лишь наличием вращающегося магнитного поля.

Электродвижущая сила самоиндукции, или реактивная э. д. с., вызывается изменением тока короткозамкнутой секции в период коммутации.

$$e_s = -\omega_k L \frac{di}{dt}. \quad (21)$$

Таким образом, э. д. с. e_s зависит целиком от величины коммутируемого тока и скорости вращения коллектора. Указанная э. д. с. находится в фазе с током, так как зависит от величины мгновенного значения того переменного тока, который подвергается коммутации: чем больше мгновенное значение тока в момент коммутации, тем больше в этот момент и e_s .

Трансформаторная э. д. с. отстает от вызывающего ее магнитного потока, а следовательно от тока преобразователя по фазе на 90° . Поэтому вектор e_s и вектор e_t находятся в квадратуре.

Результирующее напряжение в короткозамкнутой секции определится как геометрическая сумма двух э. д. с.:

$$e = \sqrt{e_t^2 + e_s^2}, \quad (22)$$

где e_s — эффективное значение средней реактивной э. д. с. Для компенсации указанных э. д. с. в преобразователе приходится применять дополнительные полюса с двумя отдельными обмотками.

Обмотка, служащая для компенсации трансформаторной э. д. с., должна создавать в зоне коммутации переменный ток с постоянной по величине амплитудой и частотой, равной частоте сети, так как э. д. с. e_t , как уже отмечалось, при любых условиях работы не меняется. Для этого надлежит эту обмотку приключить к первичной сети, причем в ее цепь нужно включить реактивную катушку, имеющую назначение сдвинуть возможно ближе к 90° коммутирующее поле B_t относительно напряжения сети и тем самым создать в короткозамкнутой секции э. д. с. e_{π} , компенсирующую э. д. с. e_t . Для компенсации реактивного напряжения вторую обмотку дополнительных полюсов включают последовательно в цепь вторичного тока.

Как на пример применения одноякорного преобразователя переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты с неподвижными щетками на коллекторе, можно указать на схему фирмы Oerlikon¹ для автоматического синхронизирования генератора с сетью. По этой схеме преобразователь приключен кольцами к сети, а щетками — к управляемому двигателю, связанному с вентилем первичного двигателя, приключаемого к сети генератора. К зажимам последнего присоединен синхронный двигатель, вращающий одноякорный преобразователь. В момент включения схемы преобразователь неподвижен, на его щетках имеет место частота сети. Управляемый двигатель вращается с максимальной скоростью, открывая вентиль первичного двигателя. По мере раскручивания последнего частота на щетках преобразователя уменьшается и при синхронном вращении генератора с сетью становится равной нулю (постоянный ток), что вызывает остановку управляемого двигателя.

¹ Герм. патент № 488 807 от 1930 г.

40. Источник переменного тока переменной частоты по типу одноякорного преобразователя с двумя обмотками на якоре. Если одновременно с преобразованием частоты необходимо осуществить и изменение (трансформацию) напряжений по тем или иным эксплуатационным требованиям, то может быть применен преобразователь частоты с двумя обмотками на якоре, одна из которых присоединена к кольцам, а другая — к коллектору. На рис. 42 изображена электрическая схема подобного преобразователя, снабженного обмоткой A , присоединяемой к первичной сети с частотой f_1 , и обмоткой B , соединенной с коллектором с неподвижными щетками. Преобразователь представляет собой трансформатор

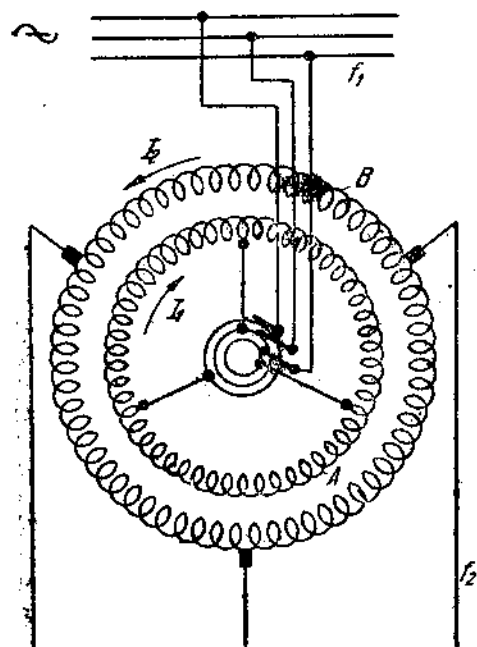


Рис. 42.

напряжения и частоты (обе обмотки уложены в одних и тех же пазах). Как в нормальном трансформаторе, по обмоткам протекают полные токи I_1 и I_2 , причем если вторичную обмотку привести к первичной, то токи будут отличаться на величину намагничивающего тока в первичной обмотке. Результирующий поток преобразователя представляет собой разность потоков, создаваемых токами I_1 и I_2 . Очевидно, что потери на джоулев эффект в этом преобразователе будут больше, чем в преобразователе с одной обмоткой, в которой действует разность токов (подобно автотрансформатору).

Общим недостатком преобразователей с неподвижными щетками является переменная скорость якоря, с которой приходится его вращать для получения того или иного значения частоты. При малых мощностях источника переменной частоты это обстоя-

тельство не играет существенной роли, при больших же мощностях вращение преобразователя с переменной скоростью от нуля до некоторого максимума требует применения первичного двигателя с весьма широкой регулировкой скорости, что удорожает и установку и ее эксплуатацию.

ГЛАВА IX.

ОБЩИЙ СЛУЧАЙ КОЛЛЕКТОРА КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ.

41. Сопоставление различных типов преобразователей. Все рассмотренные в гл. VIII источники переменного тока переменной частоты представляют собой коллекторные преобразователи переменного тока одной частоты в переменный же ток другой частоты. В частности, были разобраны

преобразователи переменного тока с частотой равной нулю (постоянный ток) в переменный ток с частотой отличной от нуля.

Для получения требуемой меняющейся частоты при неизменной первичной частоте в некоторых типах преобразователей выполнялись вращающиеся щетки при неподвижном или вращающемся с неизменной скоростью коллекторе, в других же, наоборот, щетки стояли неподвижно, а вращался с переменной скоростью коллектор.

Возможен, конечно, и более общий случай, когда и щетки и коллектор вращаются с переменной скоростью, что повлияет лишь на скорость вращения щеток и коллектора преобразователя частоты. Принципиально процесс преобразования частоты остается тем же. Основным в этом процессе является взаимное перемещение щеток и магнитного потока в преобразователях электромагнитного типа (генераторы и одноякорные преобразователи) или взаимное перемещение щеток и распределения тока в преобразователях электромеханического типа (коллекторы - ключи Маругина, Барбье-Бенара и т. п.). Если щетки оказываются неподвижными относительно потока или распределения тока, то на щетки поступает постоянный ток.

Так, в генераторе постоянного тока поток неподвижен в пространстве, поэтому при неподвижных щетках снимается постоянный ток; то же самое имеет место и в одноякорном преобразователе переменного тока в постоянный.

При вращающихся щетках постоянный ток можно получить лишь при вращающемся с той же скоростью потоке.

42. Преобразователь частоты с вращающимся полем на статоре.

Для общности картины преобразования частоты при помощи коллектора рассмотрим еще один случай преобразования частоты, в котором вращающееся поле связано со статором, а ротор (якорь) снабжен коллектором с неподвижными или вращающимися щетками.

До сих же пор мы рассматривали преобразователи с вращающимся полем, связанным с якорем. Представим себе коллекторную машину (рис. 43), статор которой возбуждается трехфазным переменным током, создающим вращающееся в расточке статора магнитное поле. Ротор снабжен обмоткой R по типу обмоток машин постоянного тока, соединенной с коллектором, на котором установлены три неподвижных щетки.

Рассмотрение работы подобной машины пригодится в дальнейшем при разборе теории коллекторных генераторов переменной частоты.

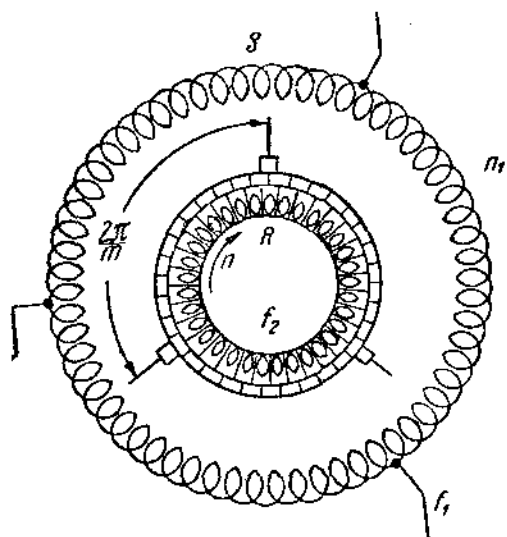


Рис. 43.

Пусть к статору двигателя подведен трехфазный ток частоты f_1 . Последний создаст вращающееся магнитное поле, делающее $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$ оборотов в минуту. Предположим затем, что ротор машины приведен во вращение в сторону вращения магнитного поля и делает n оборотов в минуту. В этом случае в каждой из секций обмотки ротора будет индуцироваться э. д. с. с числом периодов скольжения

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60} = s f_1.$$

Эффективное значение этой э. д. с. равно:

$$e_2 = 4,44 s f_1 w_k \Phi \cdot 10^{-8} \text{ В}, \quad (23)$$

где w_k — число витков в одной секции.

Указанные э. д. с. отдельных секций, суммируясь, создадут на коллекторе машины распределение потенциала по синусоиде или по кривой, практически близкой к синусоиде, представляющей собой известную уже нам потенциальную кривую. В генераторе постоянного тока эта кривая была неподвижна в пространстве, и обмотка якоря перемещалась относительно нее с числом оборотов генератора. В данном же случае потенциальная кривая перемещается относительно обмотки ротора со скоростью, пропорциональной скольжению:

$$n_2 = \frac{60 \cdot s f_1}{p} = n_1 - n.$$

Коллектор вращается с числом оборотов n , благодаря чему в пространстве потенциальная кривая перемещается со скоростью $(n_1 - n) + n = n_1$ оборотов в минуту, т. е. со скоростью вращающегося магнитного потока и независимо от скорости вращения ротора, как в асинхронном двигателе.

Так как щетки неподвижны в пространстве, то потенциальная кривая будет перемещаться и относительно их со скоростью n_1 оборотов в минуту, что вызовет на щетках разность потенциалов, изменяющуюся с частотой f_1 сети. Следовательно, частота э. д. с., индуцированных в каждой отдельной секции обмотки якоря, равна частоте скольжения, в то время как результирующая э. д. с., действующая между двумя смежными щетками коллектора, имеет частоту сети.

Если мы приведем ротор во вращение в сторону, противоположную вращению поля статора, то в роторе будут иметь место э. д. с. частоты

$$f_2 = \frac{p(n_1 + n)}{60} = s \cdot f_1,$$

где s больше единицы. В этом случае потенциальная кривая перемещается относительно обмотки ротора с числом оборотов $n_2 = n_1 + n$ (в сторону вращения поля статора). В пространстве же скорость ее перемещения будет определяться: $(n_1 + n) - n = n_1$, т. е. опять-таки с числом оборотов вращающегося поля статора. Перемещение в пространстве будет являться разностью чисел оборотов потенциальной кривой, вращающейся по полю статора, и ротора, вращающегося против указанного поля.

Таким образом, и здесь мы получаем подтверждение нашему основному положению, что частота на щетках определяется взаимным перемещением щеток и поля машины.

В данном случае магнитный поток вращается с частотой f_1 относительно неподвижных щеток. Следовательно, частота на щетках равна f_1 .

43. Преобразователь с возбуждением с ротора. В одноякорном преобразователе частоты с возбуждением на якоре напряжения на кольцах и коллекторе жестко связаны между собой (см., например, рис. 32—40).

Поэтому при любой частоте на щетках, не исключая и $f_2 = 0$, напряжение на коллекторе остается постоянным и связанным определенным образом с подведенным к кольцам напряжением. В частности, при $f_2 = 0$ имеет место напряжение постоянного тока, причем величина этого напряжения равна неизменному амплитудному значению переменного напряжения на щетках при $f_2 = 0$. Изменить напряжение U_2 можно лишь соответственным изменением напряжения U_1 . Явления в подобном преобразователе частоты совершенно не изменяются, если с сетью соединить щетки коллектора, а с приемником — кольца.

В случае же разобранный в § 42 возбуждения со статора величина напряжения на щетках коллектора будет зависеть от величины скольжения ротора по отношению к полю статора

$$E_2 = 4,44 s f_1 w_2 \Phi \cdot k_w \cdot 10^{-8},$$

где k_w — коэффициент обмотки. При $n = n_1$ и согласном вращении $E_2 = 0$. Частота же на щетках при любом скольжении будет равна частоте тока статора.

Следует еще отметить случай возбуждения с ротора при расположении генераторной обмотки на статоре (рис. 44). В последней будет индуцироваться э. д. с., пропорциональная числу оборотов поля ротора относительно статора. Это число оборотов будет равно $n_2 = n_1 \pm n$. Сумма $n_1 + n$ имеет место при согласном вращении ротора и поля ротора, а разность наоборот — при противоположных направлениях их вращения. Частота э. д. с. обмотки статора будет равна

$$f_2 = \frac{(n_1 \pm n) 60}{p}.$$

Эту же частоту имеет э. д. с. на щетках (они неподвижны в пространстве, так же, как и обмотка статора). Поэтому щетки на коллекторе и обмотка статора могут быть соединены между собой электрически, что обычно и делают в ряде многофазных коллекторных машин переменного тока, в частности с питанием через ротор, как, например, в двигателе Шраге, который представляет собой обращенный коллекторный асинхронный двигатель, т. е.

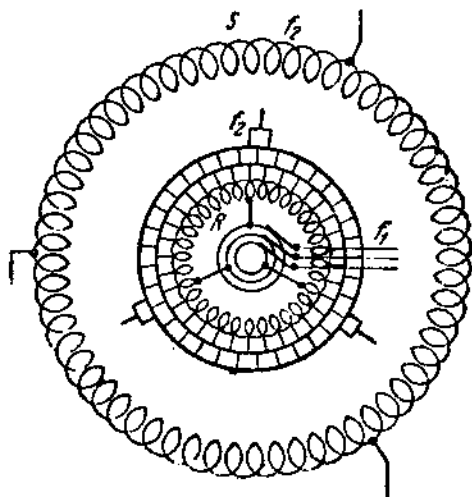


Рис. 44.

ТАБЛИЦА V.

Тип источника переменной частоты	Частота первичного тока	Частота вторичн. тока	Частота на штепс. колл.	Частота в обмотке статора	Э. д. с. на штепсах	Число оборот. вращ. поля в простр.	Число оборот. колл. статора	Э. д. с. в обмотке статора	Число оборот. статора
Двухпластинч. коллектор	0	$f_2 = \frac{n \cdot 60}{p}$	f_2	—	const	—	n	—	0
Ключ Барбье-Бенара	0	$f_2 = \frac{n \cdot 60}{p}$	f_2	—	const	—	0	—	n
Генерат. постоянн. тока	—	$f_2 = \frac{n \cdot 60}{p}$	f_2	0	const	0	$n' = \text{const.}$	—	n
Переменного тока в вращающемся штепсе	$f_1 = \frac{n_1 \cdot 60}{p}$	$f_2 = \frac{(n_1 \pm n) \cdot 60}{p}$	f_2	—	const	0	$n' = \text{const.}$	—	n
Постоянн. тока в вращающемся штепсе с вращающимся коллектором	0	$f_2 = \frac{n \cdot 60}{p}$	f_2	—	const	0	$n' = \text{const.}$	—	n
Постоянн. тока в вращающемся штепсе с неподвижным коллектором	0	$f_2 = \frac{n \cdot 60}{p}$	0	f_2	const	n	0	$E_2 \equiv n\Phi$	n
Без обмотки на статоре	$f_1 = \frac{n_1 \cdot 60}{p}$	$f_2 = \frac{(n_1 \pm n) \cdot 60}{p}$	f_2	—	const	$n_1 \pm n$	n	—	0
С обмоткой на статоре и возбуждением с ротора	$f_1 = \frac{n_1 \cdot 60}{p}$	$f_2 = \frac{(n_1 \pm n) \cdot 60}{p}$	f_2	f_2	const	$n_1 \pm n$	n	$E_2 \equiv f_1 s$	0
С обмоткой на роторе и возбуждением со статора	$f_1 = \frac{n_1 \cdot 60}{p}$	$f_2 = \frac{(n_1 \pm n) \cdot 60}{p}$	f_1	f_1	$E_2 \equiv f_2 s$	n_1	n	$E_2 = \text{const.}$	0

Однокорный преобразователь с неподвижн. штепсами

Однокорный преобразователь с вращающемся штепсом

с питанием через кольца (рис. 45), причем обмотки статора являются вторичной системой двигателя.¹

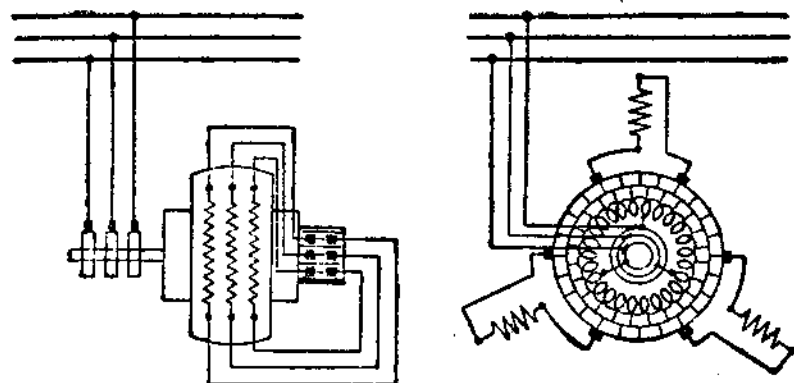


Рис. 45.

44. Сводка основных соотношений в различных преобразователях с коллектором. Ниже приводим табл. V, в которой даны соотношения э. д. с. и частот для различных источников переменной частоты.

На табл. V имеют место следующие обозначения: f_1 — частота питающего тока, n_1 — число оборотов вращающегося поля, создаваемого первичным током, n — число оборотов щеток или коллектора, требуемое для получения определенной частоты, n' — неизменное число оборотов машины, s — скольжение ротора относительно вращающегося поля машины, f — частота вторичного тока (в цепи управления).

ГЛАВА X.

КОЛЛЕКТОРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ ЧИСЛЕ ОБОРОТОВ В МИНУТУ.

45. Общие положения. Все рассмотренные выше источники переменной частоты обладают одним общим весьма существенным недостатком, препятствующим применению их для питания синхронной передачи большой мощности.

Указанный недостаток заключается в том, что вся мощность, подводимая к управляемым синхронным двигателям, проходит через источник переменной частоты, который поэтому должен рассчитываться на суммарную мощность всех приемников. При значительном числе последних и достаточной мощности их источник переменной частоты получается весьма громоздким, что само по себе не являлось бы серьезным препятствием для мощной установки, если бы не то обстоятельство, что подобный источник

¹ Более подробно см. К. И. Шенфер — Коллекторные двигатели переменного тока, 1931 г., стр. 144—145; Е. Т. З., 1914 г., № 4.

является одновременно ключом, т. е. оказывается связанным непосредственно с задаваемыми на посту управления перемещениями.

Увеличение мощности ключа влечет за собой увеличение вращающего момента для его привода и понижает степень точности передачи. При большой же мощности управление ключом вовсе становится затруднительным. Так, например, при использовании в качестве источника переменной частоты генератора постоянного тока вращающаяся траверза со щетками может получиться весьма громоздкой. Так как площадь соприкосновения щеток с коллектором с увеличением мощности возрастает, то, следовательно, возрастает требуемый для привода траверзы момент.

Как уже отмечалось ранее, характерным для всех разобранных источников переменной частоты является необходимость вращать с переменной скоростью или щетки или коллектор с якорем. При малых мощностях это вполне приемлемо, при больших же становится затруднительным отчасти вследствие необходимого большого приводного момента, отчасти вследствие наличия инерции больших вращающихся масс (коллектор и якорь или тяжелая траверза со щетками), затрудняющей быстрое изменение скорости управляемых двигателей, т. е. понижающей скорость и точность передачи. Кроме того, большая мощность ключа для управления требует большого приводного двигателя с широкой и плавной регулировкой скорости (от нуля оборотов). Подобным двигателем может быть или двигатель постоянного тока или коллекторный двигатель переменного тока. Это обстоятельство весьма удорожает и основную стоимость установки и ее эксплуатацию (большие потери при широкой регулировке скорости приводного двигателя или же весьма сложная установка для регулирования, например схема Леонарда).

Современные тенденции в области распределения энергии любого рода направлены по линии применения так называемого клапанного или вентильного управления, при котором для управления весьма большими мощностями необходимы лишь небольшие количества энергии, служащие для организации этой большой энергии в надлежащую форму при переходе ее из потенциального состояния в кинетическое. Наиболее современное выражение эти тенденции получили в применении многоэлектродных пустотных или наполненных парами ртути ламп. Путем подачи на сетку ничтожных количеств энергии они позволяют организовать в виде тока той или иной частоты и величины электрическую энергию, находящуюся в анодной цепи данной лампы. Очевидно, что прибор, включенный в цепь сетки и служащий для подачи на нее некоторого количества энергии, является ключом и может быть выполнен на весьма малую мощность при весьма высокой точности работы. Золотник паровой машины является таким же ключом-клапаном, заведующим большими количествами энергии пара.

Подобная идея клапанного управления нашла воплощение и в схемах синхронной связи в виде применения промежуточных реле, ламповых усилителей, тиратронов и коллекторных генераторов переменной частоты при постоянном числе оборотов. К рассмотрению этих последних источников переменной частоты мы и переходим.

46. Общая схема установки с коллекторным генератором. Коллекторный генератор приводится во вращение с неизменным числом оборотов каким-либо первичным двигателем (паровая турбина и т. п.) и получает от последнего механическую мощность, преобразуемую им в электрический ток переменной частоты, определяющей требуемое число оборотов управляемых синхронных двигателей.

Управление частотой генератора производится при помощи возбудителя, в качестве которого может быть взято большинство из разобранных выше источников переменной частоты. Мощность этого возбудителя составляет весьма небольшую часть от мощности коллекторного генератора, т. е. от суммарной мощности управляемых синхронных двигателей.

Наивыгоднейшие условия работы синхронных двигателей (поддержание опрокидывающего момента в допустимых пределах и т. п.) при меняющейся частоте требуют в зависимости от последней изменять определенным образом напряжение на зажимах этих двигателей. В общем случае, как известно,¹ для наивыгоднейших условий работы должно быть соблюдено следующее соотношение между частотой и напряжением:

$$\frac{U_2'}{U_2''} = \frac{f_2'}{f_2''} \sqrt{\frac{M'}{M''}}, \quad (24)$$

где U_2' и U_2'' — значения напряжения на зажимах управляемых двигателей, f_2' и f_2'' — отдельные значения меняющейся частоты питающего двигателя тока, M' и M'' — значения тормозящего момента на валу двигателей. Чаще всего тормозящий момент на валу двигателей в схеме синхронной связи бывает примерно неизменным. В этом случае соотношение принимает такой вид:

$$\frac{U_2'}{U_2''} = \frac{f_2'}{f_2''}. \quad (25)$$

Отсюда видим, что для получения устойчивости работы необходимо изменять напряжение на зажимах управляемых двигателей в соответствии с изменением их частоты. Следует, однако, оговориться, что при значении последней, равном нулю, напряжение не должно равняться нулю, так как в таком случае двигатели выпадут из синхронизма. Поэтому приведенное соотношение надо понимать как справедливое в определенных пределах, причем в случае $f_2 = 0$ напряжение должно быть наименьшим, но достаточным для удержания приемников в синхронизме. Рассмотренные выше источники переменной частоты не удовлетворяют этому требованию пропорциональности величин частоты и напряжения на зажимах двигателя. Они дают неизменное напряжение при меняющейся частоте. Это обстоятельство также является причиной, мешающей увеличению мощности подобных передатчиков. При малых мощностях вопрос наивыгоднейших условий работы двигателя не играет уж такой существенной роли и потому указанное соотношение

$$\frac{U_2'}{U_2''} = \frac{f_2'}{f_2''}$$

может и не соблюдаться.

Необходимость наличия пропорциональности между U_2 и f_2 приводит к мысли о возможности применения в схеме синхронной связи нормального синхронного генератора, у которого, как известно, величина э. д. с. E тесно связана с ее частотой при том же возбуждении:

$$E = 4 \cdot k \cdot \omega \cdot \Phi \cdot 10^{-8}.$$

¹ См. журн. „Электричество“, 1925 г., № 2, стр. 87, а также гл. XXIV настоящей книги.

Изменяя число оборотов генератора, будем иметь как раз строгую пропорциональность между напряжением и частотой. Однако в этом случае имело бы место точное соотношение

$$\frac{U_2'}{U_2} = \frac{f_2'}{f_2},$$

так что при $f_2 = 0$ (т. е. число оборотов генератора равно нулю) напряжение на зажимах генератора также равнялось бы нулю, благодаря чему двигатели потеряли бы взаимную синхронность положения в момент остановки и затем при пуске. (В зависимости от моментов торможения на валу они могли бы впасть в синхронизм при различных U_2 и f_2 для каждого из двигателей).

Весьма неудачным был бы также вопрос привода генератора, так как пришлось бы применить первичный двигатель с широкой регулировкой скорости от нуля.

Кроме того, целый ряд приводов имеет момент торможения, увеличивающийся с увеличением скорости управляемых двигателей, т. е. частоты питающего их тока. В этом случае пришлось бы увеличивать U_2 прямо пропорционально, например, квадрату частоты. При таком условии необходимо логик возбуждения синхронного генератора не держать постоянным, как это было при $M = \text{const}$, а увеличивать, например, пропорционально частоте. Удовлетворяющий этому требованию генератор при средних скоростях работал бы слабо возбужденным, т. е. был бы чрезмерно громоздким. Все это делает обычные синхронные генераторы неприемлемыми в качестве источников переменной частоты в схемах синхронной связи. Коллекторные альтернаторы лишены указанных недостатков. Соответственным автоматическим изменением величины тока возбуждения ключа-возбудителя характер изменения напряжения на зажимах коллекторного генератора, в зависимости от частоты, может быть установлен по любому закону, требуемому для данного частного случая режима работы управляемых двигателей. Для этого, конечно, необходимо особым образом выполнить ключ-возбудитель, что будет освещено далее. Отсюда и схема синхронной связи с коллекторным генератором переменной частоты при неизменном числе оборотов из схем с меняющейся частотой и синхронными двигателями является наиболее удовлетворяющей требованиям синхронной передачи. В подобной схеме разрешены весьма удачно требования мощности и скорости передачи при достаточной точности и нечувствительности к выпадению из синхронизма одного из двигателей. Вопросы точности передачи мы коснемся особо при рассмотрении работы синхронных двигателей в схемах синхронной связи.

На рис. 46 дана общая схема установки с коллекторным генератором переменной частоты. На схеме *К. Г.* — коллекторный генератор, вращаемый с постоянным числом оборотов n_0 первичным двигателем *П. Д.* Генератор питает трехфазным током переменной частоты управляемые синхронные двигатели *С. Д.* Для возбуждения генератора служит трехфазный возбудитель *В* (например ключ Маругина), вращаемый с переменной скоростью при помощи серводвигателя *Д. В.* с широкой регулировкой скорости (от нуля). Частота f_1 , получаемая от возбудителя *В*, определяет собой частоту f_2 генератора, причем частота меняется от 0 (постоянный ток) до некоторого максимума. Тип возбудителя-ключа может быть самым различным. Нужно отметить, что коллекторный генератор можно рассматривать как промежуточное устройство между ключом (возбудителем) командного поста и

приемниками — синхронными двигателями. Назначение этого промежуточного устройства — по существу выполнение функции усилителя. При малых мощностях синхронных двигателей промежуточное звено оказывается ненужным, и система превращается в одну из ранее рассмотренных нами систем.

47. Основные типы коллекторных генераторов. Существуют два основных типа коллекторных генераторов: генератор с явновыраженными полюсами (генератор Шербиуса) и генератор с неявновыраженными полюсами (генератор Костенко — Япольского).

Коллекторный генератор с явновыраженными полюсами разработан Шербиусом.¹ предложившим применить подобный генератор переменной частоты для регулирования скорости асинхронных двигателей при одновременном изменении частоты и напряжения на их зажимах.

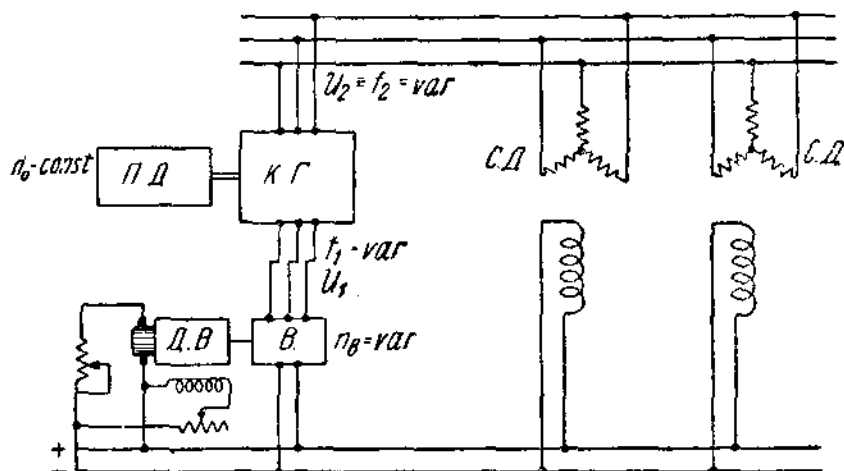


Рис. 46.

Наибольшее применение машина Шербиуса получила в каскаде ее с асинхронным двигателем для регулирования скорости последнего. Это объясняется тем, что частота, на которую с точки зрения рациональной конструкции может быть рассчитана машина Шербиуса, лежит в пределах 0—20 Hz (обычно даже до 15—18 Hz). Такое число периодов для синхронной передачи при современных требованиях к скорости передачи далеко не всегда является достаточным. Вместе с тем низкое число периодов вполне подходит для включения в каскад с асинхронным двигателем, для каковой цели машина Шербиуса оказалась чрезвычайно пригодной. Благодаря удачному разрешению вопроса коммутации мощность указанной машины достигает значений, неприменимых для обычных трехфазных коллекторных машин,—1000 kVA, а число оборотов доходит до 3000 об/мин. Система Шербиуса (каскад с асинхронным двигателем), применяемая преимущественно для привода регулируемых (неревверсивных) прокатных станков, выполняется главным образом фирмой GECO (Всеобщая Компания Электричества) в Америке и фирмой BBCo (Броун Бовери К^о) в Европе.

¹ Англ. патент № 18317, 1906 г.

Коллекторный генератор Костенко — Япольского с неявновыраженными полюсами (с круговым вращающимся полем) основан на том же принципе, что и генератор Шербиуса. Однако, имея те же самые положительные черты, что и последний, он кроме того обладает еще особенно ценным для синхронной передачи качеством, выгодно отличающим его от генератора Шербиуса, — значительно большим диапазоном частоты: от нуля до 50 и выше периодов. Вместе с тем существенным недостатком генератора Костенко — Япольского является невозможность, благодаря коммутации, изменять в машине порядок следования фаз, что ведет при реверсировании двигателей к необходимости переключений в главной цепи.

Теория генератора с неявновыраженными полюсами стоит ближе к разобранному выше преобразователю частоты, чем теория машины Шербиуса. Поэтому мы вначале остановимся на первом генераторе, а затем на основе его теории разберем и работу генератора Шербиуса.

ГЛАВА XI.

КОЛЛЕКТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С НЕЯВНОВЫРАЖЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ.

1. ТИПЫ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ.

48. Общие сведения о коллекторном генераторе с неявновыраженными полюсами. Коллекторный генератор был заявлен к патентованию Япольским и Костенко в СССР в 1921 г. (патент № 599), опыты же были начаты по этому генератору значительно раньше — в 1916 г.

Независимо от этого, в том же году в Германии были начаты опыты Козисеком (Kozisek), причем сведения о его работе появились в 1924 г.¹

Первоначально Япольский предложил применить коллекторный генератор для питания током переменной частоты ударных машин его системы (электрических молотов и т. д.), на что Костенко и Япольским в 1923 г. был получен английский патент № 214 393.² На этом же принципе (бегущее поле переменной частоты) Япольским была построена опытная модель электрической пушки.

В дальнейшем выяснилось другое, более существенное применение коллекторного генератора, именно — для целей синхронной передачи и питания больших асинхронных двигателей, работающих при изменяемой скорости (дизель-электровозы, гребные винты и т. д.). Следует отметить, что для синхронной передачи асинхронные двигатели не годятся в виду наличия скольжения и отсутствия вращающего момента при $f_2 = 0$. Рассматриваемый генератор, подобно многофазным коллекторным двигателям, состоит (рис. 47) из статора S и ротора R с коллектором K . На статоре наложена так называемая компенсирующая обмотка W_s , соединенная последовательно посредством щеток и коллектора с обмоткой ротора W_R . Последняя выполняется по типу обмоток якорей машин постоянного тока. Возбуждение, как уже отмечалось, подается от источника переменного тока переменной

¹ Е. Т. З., 1924 г., стр. 1267, и Е. Т. З., 1926 г., стр. 889.

² См. журн. „Электричество“, 1925 г., № 7.

частоты, определяющей своей величиной частоту рабочей цепи (цепи управления). Возбуждение генератора можно осуществлять как со статора (рис. 47), так и ротора (рис. 59). Кроме того, можно также осуществлять разновидность возбуждения с ротора, при которой одновременно будут иметь место и некоторые отличительные черты возбуждения со статора. В этом случае возбуждение подводится к щеткам.

49. Возбуждение со статора. Схема. Генератор выполняется многофазным и с неизменным воздушным зазором по окружности ротора, что обуславливает круговое вращающееся поле, создаваемое обмоткой возбуждения W_1 .

В одних и тех же пазах статора размещены две обмотки: первичная обмотка возбуждения W_1 и вторичная компенсирующая обмотка W_S . Электрическая схема трехфазной машины при возбуждении со статора представлена на рис. 48.

Обмотка W_S соединена при помощи щеток abc , наложенных на коллектор K со сдвигом друг относительно друга на 120° , с обмоткой W_R

ротора R , выполненной по типу обмоток якорей машин постоянного тока и являющейся по отношению к обмотке W_1 , так же как и обмотка W_S — вторичной обмоткой.

Обмотка W_1 приключена к возбудителю переменной частоты B (рис. 46) с напряжением U_1 .

Число фаз главной и возбуждающей цепи может быть взято различным, причем обмотка W_R всегда соединена многоугольником (замкнутая обмотка якоря). Обмотку же W_S можно соединить и звездой (рис. 48) и многоугольником (рис. 49). На последнем рисунке представлена схема соединения генератора с управляемым синхронным двигателем $C. Д.$ (сравни с рис. 46). Отдельные фазы генератора обмоток W_1 , W_S и W_R соответственно обозначены $I_1 I_S I_R$; $II_1 II_S II_R$; $III_1 III_S III_R$.

Как видно из рис. 49, в случае соединения обмотки W_S многоугольником приходится соединять трехфазный генератор с трехфазным приемником

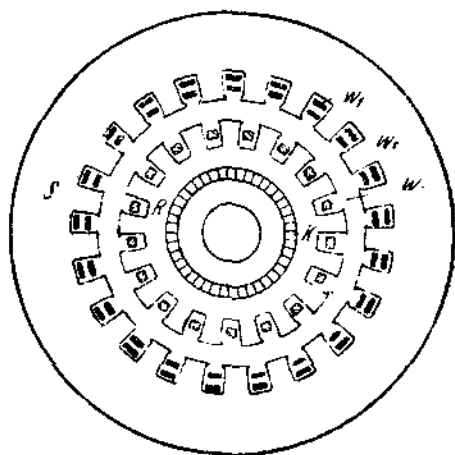


Рис. 47.

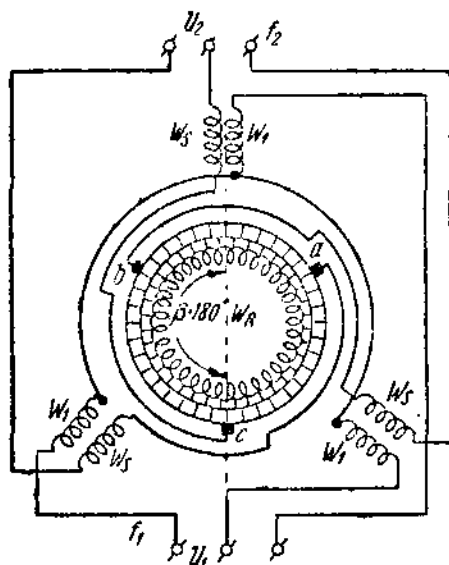


Рис. 48.

С. Д. шестью проводниками, что является менее удобным и более дорогим, чем соединение тремя проводами, которое может быть осуществлено при соединении в звезду. Поэтому последнее соединение преимущественно и применяется.

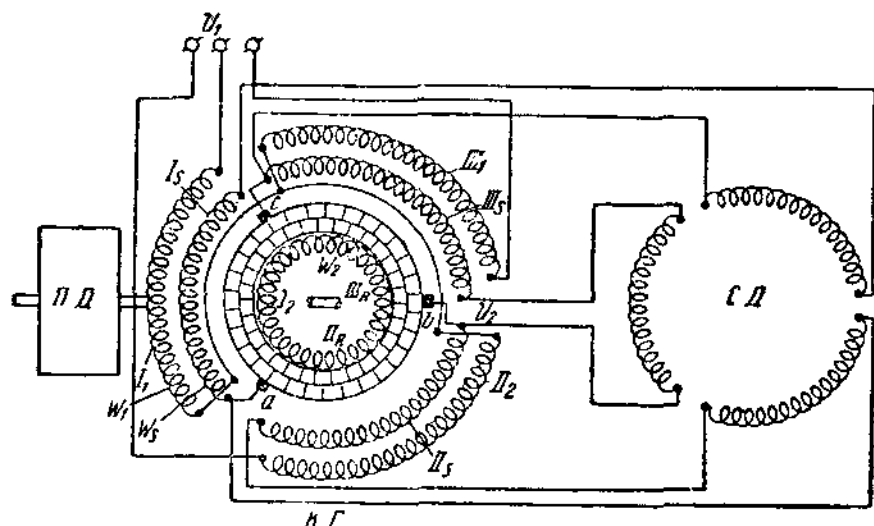


Рис. 4.

На рис. 50 для упрощения схемы показана лишь главная (рабочая) цепь коллекторного генератора при соединении в многоугольник. Следует отметить, что, благодаря наличию коллектора и щеток, при всех положе-

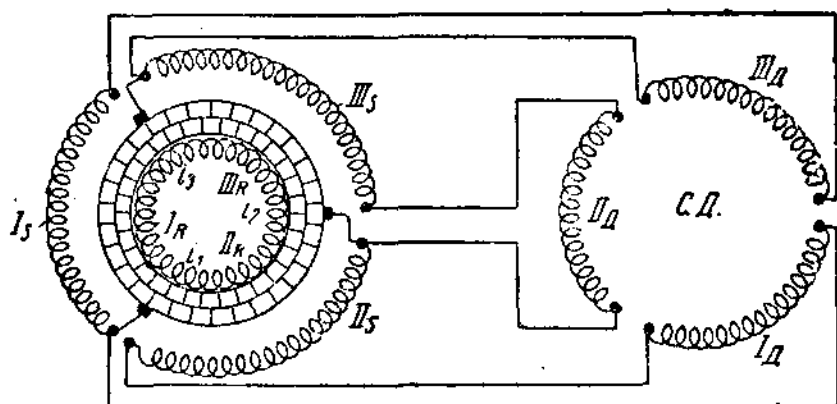


Рис. 50.

ниях ротора при его вращении отдельные фазы обмотки ротора всегда будут расположены против соответственных одноименных фаз статора, например фаза $Ш_R$ против фазы $Ш_S$ и т. д. (щетки переключают секции обмотки ротора в период коммутации из одной фазы в другую).

50. Основные соотношения в коллекторном генераторе. Допустим первоначально, что ротор генератора стоит, а в обмотке возбуждения W_1 (рис. 49) циркулирует трехфазный переменный ток I_m с частотой f_1 . Ток I_m создает вращающийся магнитный поток Φ , который в каждой фазе обмоток W_S, W_R индуцирует соответственные э. д. с., действующие значения которых при синусоидальном распределении потока будут иметь следующие значения.

Обратная э. д. с. для обмотки W_1 :

$$E_1 = 4,44 w_1 I_1 k_{w1} \Phi \cdot 10^{-8} \text{ V}, \quad (26)$$

где w_1 — число витков на фазу обмотки W_1 ; k_{w1} — обмоточный коэффициент.

Э. д. с. для обмотки W_R :

$$E_R = 4,44 w_R f_1 k_{wR} \Phi \cdot 10^{-8} \text{ V}. \quad (27)$$

Э. д. с. для обмотки W_S :

$$E_S = 4,44 w_S f_1 k_{wS} \Phi \cdot 10^{-8} \text{ V}. \quad (28)$$

Как уже отмечалось, обмотки W_S и W_R являются по отношению

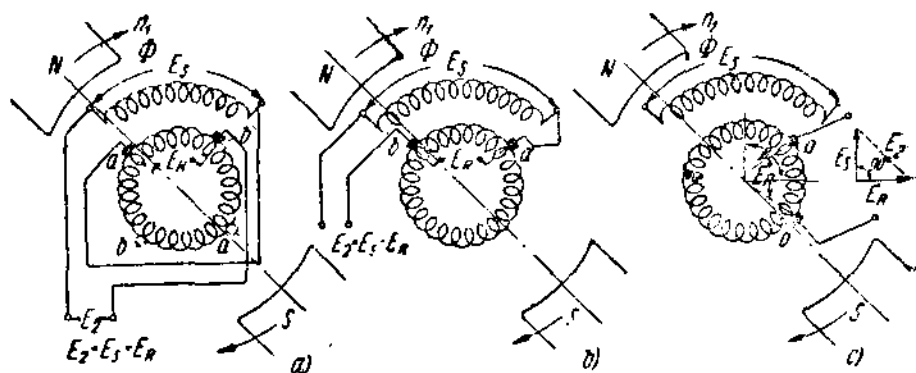


Рис. 51.

к обмотке W_1 двумя вторичными обмотками трансформатора с вращающимся магнитным полем (аналогично трехобмоточному трансформатору с пульсирующим полем). Если бы каждая из обмоток W_S и W_R была приключена на свой приемник, то мы имели бы картину работы нормального трансформатора, у которого сумма мощностей, отдаваемых двумя независимыми вторичными обмотками, равнялась бы (при пренебрежении потерями) мощности, получаемой первичной обмоткой из питающей сети.

Схема генератора такова (рис. 48), что обмотки W_S и W_R образуют одну общую электрическую цепь, будучи последовательно соединены между собой через щетки и коллектор.

Щетки на коллекторе вообще могут быть расположены любым образом. От расположения их зависит фаза э. д. с. E_R по отношению к э. д. с. E_S .

На рис. 51 показаны различные характерные положения двух щеток на коллекторе, соединенных в последовательную цепь с обмоткой одной фазы статора. Вращающееся магнитное поле представлено в виде вращающихся полюсов. Рис. 51, *a* и *b* изображает такое расположение щеток *a* и *b* на коллекторе, при котором э. д. с. E_S и E_R совпадают по фазе. Обмотку

статора со щетками можно соединить так, что э. д. с. E_S и E_R будут арифметически складываться (рис. 51, а) или арифметически вычитаться (рис. 51, б). При неизменном соединении можно перейти от первого случая ко второму, передвинув щетки на 180° (пунктир на рис. 51, а). Указанные

соединения аналогичны двум возможным соединениям в трехобмоточном трансформаторе (рис. 52, а и б).

На рис. 52, а имеет место последовательное соединение обмоток W_S и W_R , при котором общая э. д. с. E_2 равна сумме э. д. с. E_S и E_R . Для получения разности их нужно одну из обмоток „вывернуть“ (рис. 52, б), т. е. на соединении,

Рис. 52.

что рис. 52, а поменять местами концы одной из обмоток. При любом другом положении щеток на коллекторе э. д. с. E_S и E_R будут складываться между собой геометрически, причем сумма их зависит от угла поворота щеток.

На рис. 51, с изображено расположение щеток при угле $\beta = 90^\circ$. Соответственно этому и э. д. с. E_S и E_R будут сдвинуты по фазе на 90° (поток будет пронизывать одну обмотку на время, соответствующее повороту на 90° , позже чем другую обмотку). Таким образом, минимальное значение э. д. с. E_2 получится при повороте щеток на угол $\beta = 180^\circ$ из положения, при котором э. д. с. E_S и E_R арифметически складываются. Угол $\beta = 180^\circ$ представляет рабочее положение щеток генератора и остается неизменным при всех режимах его работы. При таком соединении обмотки W_S и W_R оказываются „вывернутыми“ (аналогично параллельному соединению), подобно тому, как это изображено на рис. 52, б для трансформатора с одинаковым направлением намотки вторичных обмоток.

На рис. 53 изображены одна фаза обмотки W_S статора и одна фаза обмотки W_R ротора, соединенные так, чтобы индуцируемые общим вращающимся потоком э. д. с. E_S и E_R арифметически вычитались. Действительно, вращающийся поток Φ пересекает обе обмотки в одном и том же направлении. Следовательно, э. д. с. E_S и E_R совпадают по фазе и направлению. Однако соединение их таково, что они оказываются включенными навстречу, т. е. на внешних зажимах а, а' имеет место их разность. Если

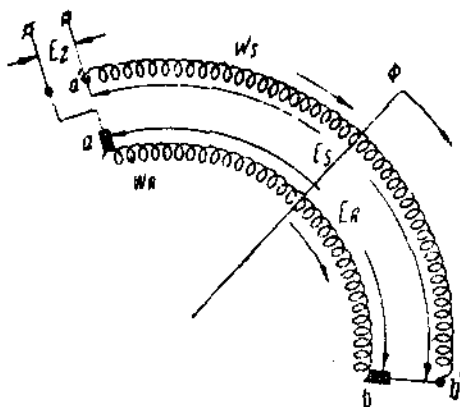


Рис. 53.

бы мы соединили зажим b' со щеткой a , то на свободных зажимах a' и b имела бы место арифметическая сумма э. д. с. E_S и E_R .

Разность их равна при неподвижном роторе:

$$E_2 = E_S - E_R = 4,44 (\omega_S k_{ws} - \omega_R k_{wR}) f_1 \Phi \cdot 10^{-8} \text{ В.} \quad (29)$$

Если обмотки W_S и W_R выполнить так, чтобы $\omega_S k_{ws} = \omega_R k_{wR}$, то э. д. с. E_2 при неподвижном роторе окажется равной нулю. Подобное равенство обычно и имеет место и устанавливается, как видно будет далее, во-первых, для получения вполне компенсированного коллекторного генератора, а во-вторых, что связано с первым, для создания пропорциональности между вторичной э. д. с. E_2 генератора и произведением величины вращающегося магнитного потока на число оборотов ротора генератора,

$$E_2 \equiv n_0 \Phi.$$

Прежде чем приступить к подтверждению справедливости указанных положений при наличии равенства

$$\omega_S k_{ws} = \omega_R k_{wR},$$

отметим, что при неподвижном роторе в отношении E_2 условие оказывается соблюденным, а именно при $n = 0$ э. д. с. E_2 также равна нулю.

Допустим теперь, что ротор генератора вращается при помощи первичного двигателя с числом оборотов n_0 по направлению вращения поля статора, т. е. поля, создаваемого обмоткой W_1 . Число оборотов ротора положим меньшим, чем число оборотов n_1 магнитного поля Φ . Ранее нами было установлено (рис. 43), что в роторе будет индуцироваться э. д. с. с числом периодов скольжения

$$f_R = \frac{p(n_1 - n_0)}{60} = \frac{pn_1}{60} - \frac{pn_0}{60} = f_1 - f_0,$$

где $f_0 = \frac{pn_0}{60}$ представляет собой частоту, соответствующую числу оборотов ротора n_0 , аналогично тому, как это имеет место при рассмотрении работы асинхронного двигателя.

Действующее значение этой э. д. с. равно

$$E_R = 4,44 \omega_R k_{wR} f_R \Phi \cdot 10^{-8} = 4,44 \omega_R k_{wR} (f_1 - f_0) \Phi \cdot 10^{-8} \text{ В.}$$

Полученное значение э. д. с. E_R будет действовать на щетках генератора, причем частота ее на щетках будет не f_R , а f_1 , благодаря тому, что щетки неподвижны в пространстве. Потенциальная кривая перемещается по коллектору с числом оборотов n_R , соответствующим частоте ротора f_R ; кроме того, сам ротор перемещается с числом оборотов $n_0 = \frac{60f_0}{p}$; ранее было установлено, что $n_0 + n_R = n_1$; следовательно, в общей сложности потенциальная кривая перемещается относительно неподвижных щеток со скоростью $n_1 = \frac{60f_1}{p}$, т. е. частота э. д. с. E_R на щетках равна f_1 — частоте тока возбуждения на статоре. В обмотке W_S последнего попрежнему будет индуцироваться э. д. с.

$$E_S = 4,44 \omega_S k_{ws} f_1 \Phi \cdot 10^{-8} \text{ В.}$$

Вторичная э. д. с. E_2 попрежнему будет равна разности э. д. с. E_S и E_R , так как положение щеток не изменилось и направление вращения потока также осталось прежним. Изменилась лишь величина э. д. с. E_R , благодаря тому, что скольжение стало меньше единицы. Можем написать:

$$E_2 = E_S - E_R = 4,44 \, w_s k_{ws} f_1 \Phi \cdot 10^{-8} - 4,44 \, w_R k_{wR} f_R \Phi \cdot 10^{-8} = \\ = 4,44 \, w_s k_{ws} f_1 \Phi \cdot 10^{-8} - 4,44 \, w_R k_{wR} (f_1 - f_0) \Phi \cdot 10^{-8},$$

так как ранее было установлено, что:

$$f_R = f_1 - f_0.$$

Приняв во внимание, что:

$$w_s k_{ws} = w_R k_{wR}$$

по условию и раскрыв скобки, получим

$$E_2 = 4,44 \, w_R k_{wR} \cdot f_0 \Phi \cdot 10^{-8}, \quad (30)$$

где

$$f_0 = \frac{p n_0}{60},$$

т. е. приходим к выводу, что

$$E_2 \equiv n_0 \Phi;$$

при $\Phi = \text{const}$ получим

$$E_2 \equiv n_0. \quad (31)$$

Как увидим в дальнейшем, полученные результаты справедливы при любом соотношении n_1 и n_0 (f_1 и f_0) и любом направлении вращения поля по отношению к направлению вращения ротора (согласному или противоположному). Ранее, кроме того, указывалось, что коллекторный генератор вращается с неизменным числом оборотов, т. е. $n_0 = \text{const}$. Это обстоятельство отмечалось как весьма существенное положительное качество коллекторного генератора. Таким образом, если $n_0 = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$, то э. д. с. $E_2 = \text{const}$.

Мы пришли к весьма важному выводу, что величина э. д. с. E_2 компенсированного коллекторного генератора пропорциональна числу оборотов и магнитному потоку и не зависит от числа периодов тока возбуждения f_1 , причем число периодов указанной э. д. с. E_2 всегда равно числу периодов f_1 , задаваемому генератору ключом-возбудителем. Так как обычно $n_0 = \text{const}$, то величина э. д. с. E_2 будет целиком зависеть от величины потока Φ , который, в свою очередь, определится током возбуждения I_m (при ненасыщенной машине имеет место прямая пропорциональность $\Phi \equiv I_m$).

Разберем ряд характерных частных случаев соотношения между n_1 и n_0 . При всех значениях n_1 величина n_0 остается постоянной, как неизменным остается и направление вращения ротора. Примем его происходящим по часовой стрелке (рис 54, а, где в упрощенном виде изображена схема генератора).

Случай 1. Поле статора и ротор вращаются в одном направлении.

Допустим первоначально, что и поток, так же как и ротор, вращается по часовой стрелке:

1) $n_1 > n_0$; $\Phi \curvearrowright$ и $n_0 \curvearrowright$.

При $n_1 > n_0$ имеем уже полученные выше соотношения, показанные условно на рис. 54, б (режим аналогичный режиму асинхронного двигателя).

Здесь поток пересекает обмотку ротора со скоростью n_R (направление движения потока относительно ротора — по часовой стрелке).

$$2) n_1 = n_0; \Phi \curvearrowright \text{ и } n_R \curvearrowright.$$

При $n_1 = n_0$ (рис. 54, c) будет иметь место синхронное вращение поля статора и обмотки ротора. Поток последнего вовсе не пересекает обмотку и поэтому в ней никакой э. д. с. индуцироваться не будет, т. е. $E_R = 0$ (синхронный режим). В таком случае э. д. с. E_2 окажется равной э. д. с. E_S .

$$E_2 = E_S - E_R = E_S,$$

$$E_2 = E_S = 4,44 \omega_s k_{ws} f_1 \Phi \cdot 10^{-8},$$

но так как $n_1 = n_0$, т. е. $f_1 = f_0$, то

$$E_2 = 4,44 \omega_s k_{ws} f_0 \Phi \cdot 10^{-8} \equiv n_0 \Phi.$$

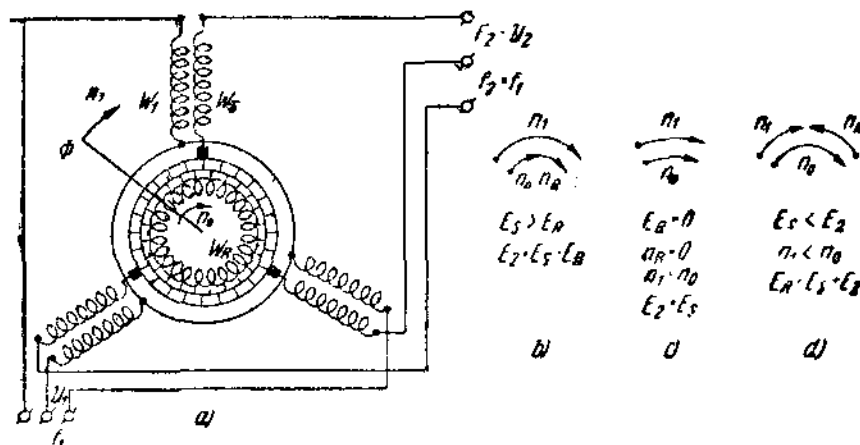


Рис. 54.

Следовательно, получим ту же зависимость для э. д. с. E_2 , что и раньше.

Теперь представим, что число оборотов вращающегося поля n_1 меньше, чем число оборотов ротора n_0 .

$$3) n_1 < n_0; \Phi \curvearrowright \text{ и } n_0 \curvearrowright.$$

В этом случае (рис. 54, d) обмотка ротора обгоняет поле статора, в силу чего указанное поле будет относительно ротора двигаться в направлении обратном вращению ротора, аналогично режиму асинхронного генератора. Потенциальная кривая по коллектору также будет двигаться в обратном направлении, в силу чего частота на щетках окажется опять-таки равной f_1 , в этом случае $f_1 = f_0 - f_R$.

При таком соотношении n_1 и n_0 поток Φ пересекает обмотку W_S в одном направлении (на рис. 54 — по часовой стрелке), а обмотку W_R — в обратном направлении (на рис. 54 — против часовой стрелки). Благодаря этому фазы э. д. с. E_S и E_R окажутся сдвинутыми на 180° друг относительно друга, в силу чего при сохранении прежнего расположения щеток э. д. с. E_S и E_R будут арифметически не вычитаться, а складываться:

$$E_2 = E_S - (-E_R) = 4,44 \omega_s k_{ws} \Phi_1 (f_1 + f_R) \cdot 10^{-8}.$$

Мы ранее установили, что в этом случае $f_0 = f_1 + f_R$, следовательно,

$$E_2 \equiv n_0 \Phi.$$

Случай II. $n_1 = 0$.

Прежде чем перейти к случаю вращения поля статора и обмотки ротора в противоположные стороны, остановимся на промежуточном случае.

Переходным между рассмотренным режимом и только что указанным является частный случай, когда $n_1 < n_0$, а именно $n_1 = 0$ и $f_1 = 0$, т. е. в обмотку W_1 подается от возбuditеля постоянный ток. Этот последний создает неподвижное в пространстве поле, причем положение его определяется соотношением токов возбуждения в фазах обмотки W_1 , что в свою очередь зависит от положения щеток на коллекторе возбuditеля. Ротор

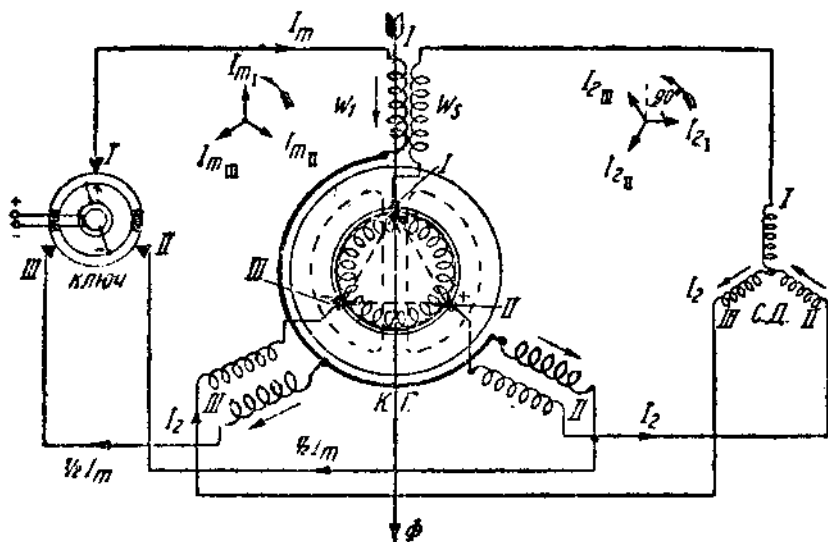


Рис. 55.

генератора окажется вращающимся в неподвижном в пространстве поле, т. е. превратится в генератор постоянного тока, причем величина э. д. с. E_2 будет равна э. д. с. E_R , снимаемой с коллектора, так как в обмотке W_2 ничего индуктироваться не будет благодаря тому, что поток Φ окажется при возбуждении постоянным током неподвижным относительно обмотки W_2 . Как известно, величина э. д. с. генератора постоянного тока пропорциональна потоку и числу оборотов, т. е. $E_2 \equiv \Phi \cdot n_0$ (очевидно, что частота э. д. с. E_2 равна $f_1 = 0$). Распределение потенциалов постоянного напряжения на щетках будет находиться в зависимости от положения в пространстве потока, что, как уже отмечалось, связано с положением щеток на коллекторе возбuditеля. Указанное иллюстрирует рис. 55 и 56, причем на рис. 55 изображено распределение токов в первичной и вторичной цепях коллекторного генератора (К. Г.) при исходном положении коллектора-ключа (см. рис. 3). Постоянный ток, получаемый от ключа, проходит по всем трем фазам обмотки W_1 и создает неподвижный в пространстве магнитный поток, ось которого совпадает с осью первой фазы обмотки W_1 , имеющей при

данном положении щеток возбуждителя максимум тока I_m (в двух других фазах ток имеет половинное значение от тока первой фазы и направлен в противоположную сторону по сравнению с последним). На щетках *I, II, III* коллекторного генератора действует напряжение постоянного тока, причем распределение потенциала на щетках зависит от положения их относительно оси потока. Для данного случая имеем, в соответствии с распределением потенциала на щетках, такое распределение постоянного тока в фазах обмотки управляемого синхронного двигателя (*С. Д.*), что в фазе *I* ток равен нулю, а в фазах *II* и *III* проходят равные и противоположно направленные токи. Интересно отметить, что намагничивающий ток I_m и совпадающий с ним по фазе магнитный поток Φ опережают по фазе на 90° фазную э. д. с. E_2 и совпадающий с ней по фазе ток I_2 (постоянный ток).

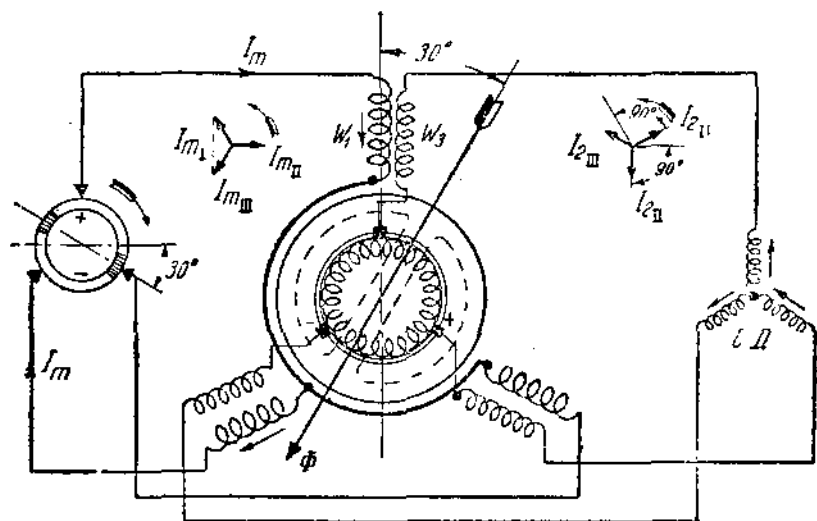


Рис. 56.

Так, например, в фазе *I* обмотки W_1 имеет место максимум тока, в то время как в фазе *I* синхронного двигателя ток равен нулю. Рис. 56 изображает картину распределения токов и расположения потока при сдвиге ключа-коллектора на 30° из исходного положения, представленного на рис. 55. Сдвиг коллектора на 30° вызывает сдвиг оси потока коллекторного генератора также на 30° . Распределение потенциалов постоянного тока на неподвижных щетках генератора благодаря этому соответственным образом меняется. Теперь во второй фазе обмотки синхронного двигателя имеет место максимум тока (во второй фазе обмотки W_1 ток $I_m = 0$; см. векторную диаграмму рис. 56).

Случай III. Ротор и поле статора вращаются в разные стороны.

В случае вращения поля статора в сторону, противоположную направлению вращения ротора, прежде всего изменится порядок следования фаз по сравнению с вращением поля по вращению ротора, следовательно, управляемый синхронный двигатель должен пойти в обратную сторону.

Э. д. с. E_S попрежнему будет равна

$$E_S = 4,44 \, w_s \, k_{ws} \, f_1 \, \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Частота перерезывания обмотки ротора полем статора окажется соответствующей сумме чисел оборотов поля и ротора ($n_1 + n_0$), т. е.

$$f_R = f_1 + f_0,$$

следовательно,

$$E_R = 4,44 \omega_R k_{wR} (f_1 + f_0) \Phi \cdot 10^{-8}.$$

В данном случае

$$E_R > E_S,$$

причем

$$E_2 = E_R - E_S.$$

E_2 является полезной э. д. с., полученной вращением ротора (э. д. с. генератора), поэтому ее надлежит считать всегда положительной и по отношению к ней определять знаки остальных э. д. с.

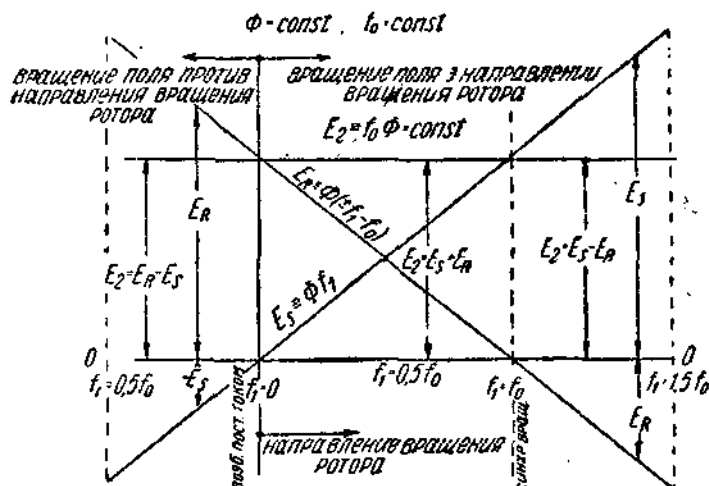


Рис. 57.

Выражение для E_2 в обоих случаях направления вращения поля может быть объединено следующим образом:

$$E_2 = E_S - E_R = 4,44 \omega_s k_{ws} (\pm f_1) \Phi \cdot 10^{-8} - \\ - 4,44 \omega_R k_{wR} (\pm f_1 - f_0) \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Знак плюс при f_1 соответствует направлению вращения магнитного потока в ту же сторону, что и направление вращения ротора, знак минус соответствует обратному направлению вращения потока Φ . Очевидно, что в обоих случаях э. д. с.

$$E_2 = 4,44 \omega_R k_{wR} f_0 \Phi \cdot 10^{-8} \text{ (при } \omega_R k_{wR} = \omega_s k_{ws} \text{)}.$$

На рис. 57 графически представлены соотношения э. д. с. коллекторного генератора при постоянном числе оборотов ротора ($f_0 = \text{const}$), при $\Phi = \text{const}$ и переменном числе периодов f_1 . Из характеристик видно, что

в случае согласного направления вращения поля и ротора при $f_1 - f_0 < 0$ E_R арифметически складывается с E_S ; при $f_1 - f_0 > 0$ E_R арифметически вычитается из E_S и при $f_1 - f_0 = 0$ $E_R = 0$. В случае же противоположного направления вращения поля и ротора E_S арифметически вычитается из E_R .

На рис. 58 представлены соотношения э. д. с. для другого режима работы коллекторного генератора. Здесь частота возбуждения $f_1 = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$. Переменной является скорость вращения ротора n_0 ($f_0 = \text{var}$). Из сопоставления рис. 57 и 58 видно, что при переходе от одного режима к другому меняются местами э. д. с. E_2 и E_S . В первом случае $E_2 = \text{const}$, во втором же $E_S = \text{const}$. Это вытекает из известных уже соотношений:

$$E_2 \equiv \Phi \cdot f_0; \quad E_S \equiv \Phi \cdot f_1.$$

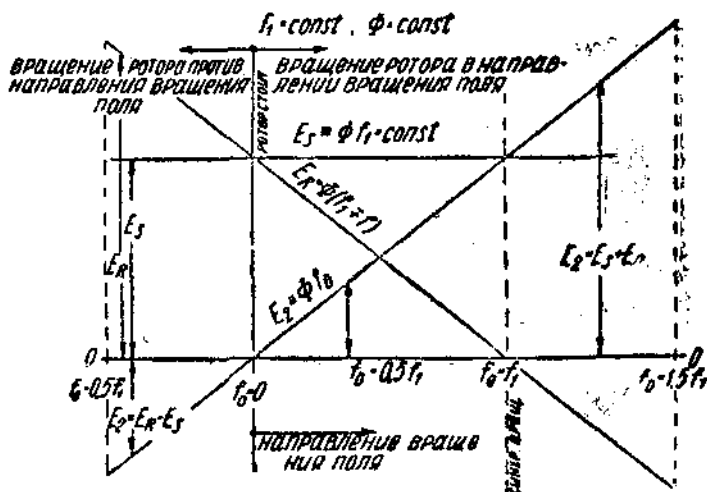


Рис. 58.

51. Генератор с неполной компенсацией. Ранее мы полагали, что генератор является полностью комплексируемым, т. е.

$$\omega_s k_{ws} = \omega_R k_{wR}.$$

Допустим теперь, что у нас подобное равенство не имеет места. Тогда при неподвижном роторе вторичная э. д. с. E_2 будет равна:

$$E_2 = E_S - E_R = 4,44 (\omega_s k_{ws} - \omega_R k_{wR}) \Phi (\pm f_1) \cdot 10^{-8} \text{ V}.$$

При вращении ротора с числом оборотов n_0 э. д. с. ротора:

$$E_R = 4,44 \omega_R k_{wR} (\pm f_1 - f_0) \Phi \cdot 10^{-8} \text{ V},$$

как было установлено ранее.

Вторичная э. д. с. в этом случае равна:

$$E_2 = E_S - E_R = 4,44 \omega_s k_{ws} (\pm f_1) \cdot \Phi \cdot 10^{-8} - \\ - 4,44 \omega_R k_{wR} (\pm f_1 - f_0) \cdot \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Можно также E_2 представить в следующем виде:

$$E_2 = 4,44 \omega_R k_{wR} f_0 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} + 4,44 (\omega_R k_{wR} - \omega_R k_{wR}) (\pm f_1) \cdot \Phi \cdot 10^{-8} = \\ = E_B + E_T.$$

Первый член E_B этого выражения представляет собой э. д. с. E_2 , возникающую при вращении ротора со скоростью n_0 в полностью компенсированном генераторе. Второй член E_T равен значению э. д. с. E_2 при неполной компенсации и неподвижном роторе (меняется с изменением f_1) э. д. с. E_B зависит только от механической скорости ротора (f_0) и величины магнитного потока Φ (э. д. с. вращения). Э. д. с. E_T является трансформаторной э. д. с., созданной индуктивной связью обмотки W_1 и некоторой комбинированной обмотки, представляющей собой разность витков обмоток W_S и W_R ($\omega_s k_{ws} - \omega_R k_{wR}$). Как уже отмечалось, при вполне компенсированном генераторе:

$$E_2 = 4,44 \omega_R k_{wR} f_0 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} = E_B.$$

Э. д. с. E_T в этом случае равна нулю.

52. Возбуждение с ротора. Коллекторный генератор может также возбуждаться с ротора, причем соотношения э. д. с. получаются иными, чем при возбуждении со статора. Однако, неизменным остается положение, что э. д. с. E_2 пропорциональна потоку Φ и числу оборотов ротора. Схема генератора с возбуждением с ротора представлена на рис. 59. Обмотка W_1 возбуждения наложена на ротор и находится в тех же пазах, что и рабочая обмотка ротора. Первая обмотка соединена с кольцами, например тремя, на которые наложены щетки для подведения тока возбуждения I_m . Вторая обмотка W_R соединена с коллектором. На статоре имеется компенсирующая обмотка W_S , такая же, как и при возбуждении со статора. Обмотка W_S соединена с обмоткой W_R при помощи коллектора и щеток.

По типу возбуждения коллекторный генератор с возбуждением с ротора подобен коллекторному двигателю Шраге, имеющему две обмотки на роторе — первичную, соединенную с кольцами, и вторичную, соединенную с коллектором и при помощи щеток со вторичной же обмоткой статора.

В случае возбуждения со статора частота в обмотке статора, а следовательно и в управляемой линии, всегда равна частоте возбуждения, в рассматриваемом же случае частота в обмотке статора равна частоте скольжения, т. е. не равна частоте возбуждения. В первом случае $E_S \equiv f_1 \Phi$, а во втором э. д. с. $E_R \equiv f_1 \Phi$.

При неподвижном роторе имеет место точно такое же соотношение э. д. с., как и при возбуждении со статора, что очевидно, так как в обоих случаях все обмотки неподвижны (трансформатор с вращающимся полем).

В общем случае при неподвижном роторе результирующая вторичная э. д. с. E_2 будет равна:

$$E_2 = E_S - E_R = 4,44 (\omega_s k_{ws} - \omega_R k_{wR}) f_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ V.}$$

Если коллекторный генератор полностью компенсирован, то:

$$\omega_s k_{ws} = \omega_R k_{wR}$$

Тогда при неподвижном роторе $\mathcal{E}_2 = 0$ (так же, как и при возбуждении со статора).

Рассмотрим несколько характерных случаев соотношения n_1 и n_0 при согласном и противоположном направлении вращения ротора и поля ротора.

Поле ротора и ротор вращаются в одну сторону.

В этом случае поле ротора вращается в пространстве с числом оборотов, равным сумме числа оборотов самого ротора и поля ротора относительно ротора.

Число оборотов поля в пространстве назовем через $n_s = n_2$, где n_2 — число оборотов, соответствующее частоте в управляемой сети f_2 , равной в коллекторном генераторе частоте в обмотке статора f_s . Таким образом $n_s = n_2 = n_1 + n_0$ и $f_s = f_2 = f_1 + f_0$. Очевидно, что э. д. с. статора E_s имеет частоту $f_s = f_1 + f_0$. Подобную же частоту имеет и э. д. с. E_R на щетках генератора (частота э. д. с. E_R в обмотке ротора равна f_1). В случае возбуждения с ротора генератор в отношении преобразования частоты работает как одноякорный преобразователь частоты, вращаемый с переменной скоростью, чему в

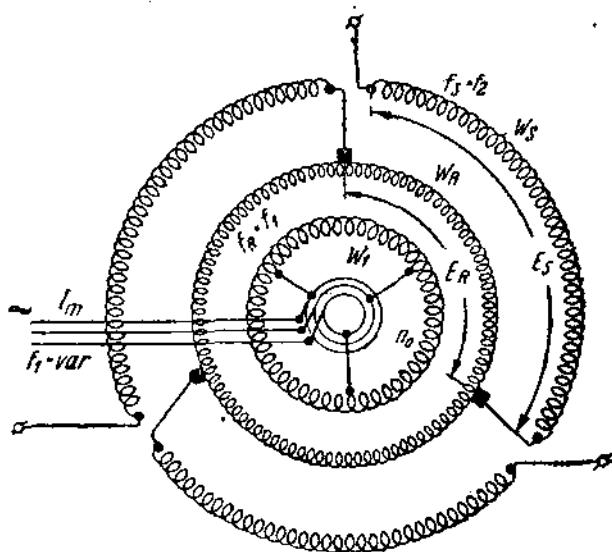


Рис. 59.

данном случае соответствует, вместо изменения скорости якоря, изменение частоты f_1 тока возбуждения.¹

Вторичная результирующая э. д. с. E_2 при вращении ротора генератора по полю равна (очевидно, что $E_s > E_R$):

$$E_2 = E_s - E_R = 4,44 k_{ws} \cdot \omega_s \Phi (f_0 + f_1) 10^{-8} - 4,44 k_{wR} \cdot \omega_R \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot 10^{-8}.$$

При равенстве:

$$k_{ws} \cdot \omega_s = k_{wR} \cdot \omega_R$$

э. д. с. E_2 равна, как и ранее,

$$E_2 = 4,44 k_{ws} \omega_s \Phi f_0 \cdot 10^{-8} \equiv f_0 \Phi.$$

¹ О преобразовании частоты — см. подробнее гл. X.

Частота f_1 тока возбуждения равна нулю.

В этом случае ротор возбуждается постоянным током, благодаря чему поле ротора будет неподвижно относительно ротора и вместе с тем окажется вращающимся в пространстве (следовательно, и относительно неподвижной обмотки статора) с числом оборотов n_0 . Режим работы коллекторного генератора будет аналогичен режиму работы синхронного генератора. Частота тока в обмотке статора будет равна частоте механического вращения $f_s = f_0 = f_2$. В случае же возбуждения со статора при частоте возбуждения $f_1 = 0$ в цепи управления частота тока $f_2 = 0$. Очевидно, что частота $f_s = f_0$ является наименьшей возможной частотой при вращении поля ротора в сторону вращения самого ротора.

Случай вращения поля в сторону противоположную вращению ротора. Число оборотов поля меньше числа оборотов ротора.

Установим прежде всего, каково будет число оборотов поля в пространстве, т. е. относительно обмотки статора и неподвижных щеток. Нами было принято, что $n_0 > n_1$. Таким образом поле вращается по ротору с числом оборотов n_1 , в то время как сам ротор вращается с числом оборотов n_0 , благодаря чему в пространстве поле будет вращаться со скоростью $n_2 = n_0 - n_1$ в сторону вращения ротора.

Э. д. с. статора

$$E_S = 4,44 \, w_s \, k_{ws} \, f_2 \, \Phi \cdot 10^{-8} = 4,44 \, w_s \, k_{ws} \, (f_0 - f_1) \, \Phi \cdot 10^{-8} \, \text{В.}$$

Э. д. с. ротора

$$E_R = 4,44 \, w_R \, k_{wR} \, f_1 \, \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Результирующая э. д. с. генератора E_2 в рассматриваемом случае должна равняться сумме э. д. с. E_S и E_R , а не их разности, так как поток пересекает обмотки W_S и W_R в противоположных направлениях, а именно: обмотку W_R поток пересекает против направления вращения ротора (по условию), а обмотку статора — по направлению вращения ротора, так как $n_0 > n_1$. Обмотки же W_S и W_R соединены так, что при пересечении их потоком в одном направлении индуцируемые в них э. д. с. E_S и E_R вычитаются.

Таким образом

$$\begin{aligned} E_2 &= E_S + E_R = 4,44 \, w_s \, k_{ws} \, (f_0 - f_1) \, \Phi \cdot 10^{-8} + 4,44 \, w_R \, k_{wR} \, f_1 \, \Phi \cdot 10^{-8} = \\ &= 4,44 \, w_s \, k_{ws} \cdot f_0 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \equiv f_0 \, \Phi. \end{aligned}$$

Получаем то же самое соотношение, что и выше. Частота э. д. с. статора равна $f_2 = f_0 - f_1$ (меньше, чем при возбуждении ротора постоянным током). Порядок следования фаз сохраняется тот же, что и при совпадении направления вращения поля и ротора.

Число оборотов поля равно числу оборотов ротора.

Поле генератора вращается в этом случае относительно ротора с числом оборотов $n_1 = n_0$. Сам ротор вращается с этим же числом оборотов в сторону, противоположную вращению поля, благодаря чему поле оказывается неподвижным в пространстве и, следовательно, неподвижным относительно статора и щеток. Благодаря неподвижности поля относительно статора в обмотке W_S никакой э. д. с. не индуцируется (э. д. с. $E_S = 0$). Неподвижность поля относительно щеток обуславливает неподвижность относительно последних потенциальной кривой коллектора, т. е. на щетках

будет иметь место постоянная разность потенциалов, дающая, в случае замкнутости цепи управления, постоянный ток, фиксирующий роторы ведомых синхронных двигателей в неизменном положении. Если сравнить генератор с возбуждением с ротора с генератором, возбуждаемым со статора, то окажется, что для получения в цепи управления постоянного тока во втором случае в обмотку возбуждения нужно посылать постоянный же ток, тогда как в первом случае ротор надлежит возбуждать током частоты $f_1 = f_0$ с таким чередованием фаз, чтобы поле возбуждения вращалось в противоположную сторону по сравнению с вращением ротора. В рассматриваемом случае в отношении преобразования частоты генератор работает как одноякорный преобразователь переменного тока в постоянный. Очевидно, что генерируемая в этом случае э. д. с. E_R будет пропорциональна $f_1 \Phi = f_0 \Phi$. Как уже отмечалось, э. д. с. $E_S = 0$. Следовательно, $E_2 = E_R \equiv f_0 \Phi$, причем значение э. д. с. E_2 будет равно амплитудному значению э. д. с. E_R , индуцируемой потоком Φ , так же как и во всяком одноякорном преобразователе переменного тока в постоянный.

Число оборотов поля больше числа оборотов ротора.

При соотношении $n_1 > n_0$ и вращении поля в сторону, противоположную вращению ротора, число оборотов поля в пространстве окажется равным $n_2 = n_1 - n_0$. Это же число оборотов потенциальная кривая коллектора будет делать относительно щеток. Поток генератора в этом случае пересекает обмотки W_S и W_R в одном и том же направлении, а именно — против направления вращения ротора. Поэтому э. д. с. E_S и E_R должны вычитаться.

Так как э. д. с. E_2 является полезной э. д. с., то ее надлежит считать всегда положительной и по отношению к ней определять знаки остальных э. д. с. Следовательно, нужно по этим соображениям для определения э. д. с. E_2 вычитать из большей э. д. с. меньшую. Так как э. д. с.

$$E_R \equiv \Phi \cdot n_1,$$

а э. д. с.

$$E_S \equiv \Phi (n_1 - n_0),$$

то

$$E_2 = E_R - E_S \equiv \Phi \cdot n_0.$$

Благодаря тому, что поток теперь пересекает обмотку статора в направлении, противоположном вращению ротора, и потенциальная кривая коллектора движется относительно щеток также в направлении, противоположном вращению ротора, порядок следования фаз генератора станет обратным по сравнению с порядком следования фаз при $n_1 < n_0$ и разном направлении вращения ротора и поля или при согласном вращении ротора и его поля. Результатом перемены следования фаз в генераторе является перемена направления вращения управляемых синхронных двигателей. Таким образом, в генераторе как при возбуждении со статора, так и при возбуждении с ротора вопрос изменения порядка следования фаз (вопрос о реверсировании двигателей в системе) принципиально разрешается весьма просто и без переключений в главной цепи. Однако в действительности благодаря требованиям, предъявляемым коммутацией, такое разрешение вопроса реверсирования двигателей оказывается мало пригодным (об этом см. далее гл. XI).

53. Генератор с возбуждением с ротора при одной обмотке на последнем. По устройству ротора коллекторный генератор может

быть еще больше сближен с нормальным одноякорным преобразователем тем, что вместо двух обмоток на роторе (рис. 59) может быть применена всего одна обмотка, служащая одновременно и для возбуждения и в качестве рабочей обмотки ротора (рис. 60). В этом случае обмотка W_R (она же и обмотка W_1) соединена и с кольцами и с коллектором. Э. д. с. цепи возбуждения $E_1 = E_R$. Очевидно, что такое совмещение дает экономию в стоимости генератора. Все соотношения, приведенные для генератора с возбуждением с ротора при двух обмотках W_R и W_1 на роторе, остаются в силе для генератора по рис. 60. Следует лишь отметить, что напряже-

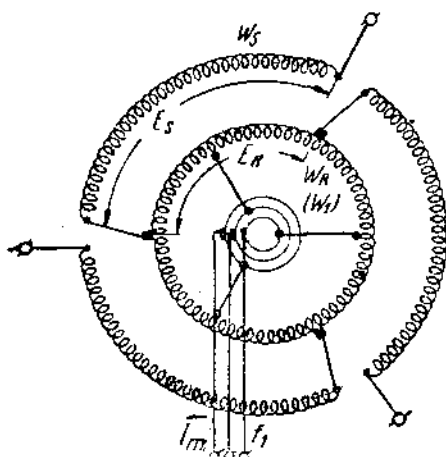


Рис. 60.

ние цепи возбуждения по величине оказывается связанным с остальными э. д. с., что не всегда может оказаться удобным.

Возможно и еще одно разрешение вопроса при возбуждении с ротора и одной обмотке на нем. Это так называемое возбуждение со щеток (рис. 61). Выше указывалось, что при одной обмотке на роторе генератора, возбуждаемого с ротора, э. д. с. $E_1 = E_R$. Величина э. д. с. E_R будет действовать на щетках при другой периодичности, определяемой числом оборотов потенциальной кривой относительно щеток. Картина возбуждения генератора не изменится, если ток возбуждения соответственной периодичности подвести не к кольцам, а непосредственно к щеткам. В такой схеме генератора щетки оказываются использованными двояким образом: для подведе-

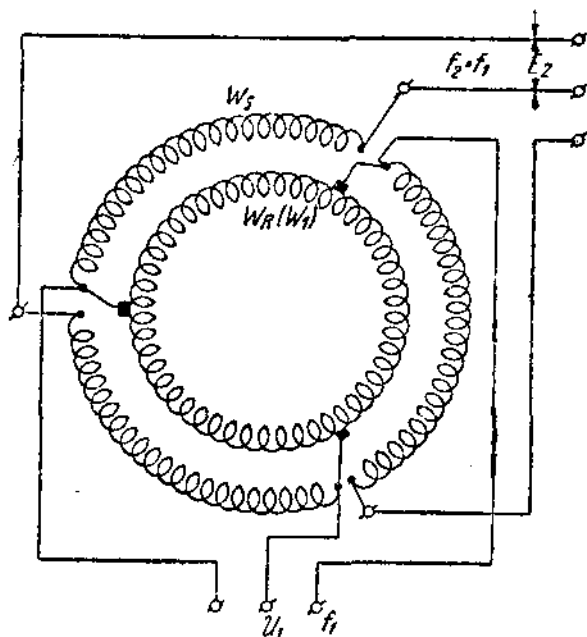


Рис. 61.

нения возбуждения и для снятия рабочего тока. Очевидно, что в этом случае периодичность на щетках будет являться периодичностью тока возбуждения,

т. е. равняться величине f_1 . Так как ток возбуждения обтекает роторную обмотку, то подобную схему возбуждения нужно считать возбуждением с ротора, а не со статора, хотя в этом случае число периодов возбуждения будет равняться частоте статора, а не ротора (о соответствии частот в якоре и на щетках — см. главу X, посвященную коллектору как общему случаю преобразователя частоты). Следовательно, в схеме по рис. 61 мы имеем как бы промежуточный случай между генераторами с возбуждением со статора и ротора. Возбуждение со щеток можно сравнить с работой асинхронного генератора, который через одни и те же зажимы (зажимы статора) получает намагничивающий ток и отдает в сеть выработанную им электрическую мощность.

54. Генератор с возбуждением со статора с комбинированной обмоткой на статоре. При возбуждении со статора обмотка возбуждения может представлять или независимую от компенсирующей обмотку, соединенную звездой или треугольником, или может присоединяться одними своими концами к выводным концам компенсирующей обмотки (рис. 62). Такая схема подобна схеме автотрансформатора. В отношении принципа действия схема по рис. 62 ничем не отличается от генератора с возбуждением со статора при раздельных обмотках W_s и W_1 . Так, например, при возбуждении постоянным током получим генератор постоянного тока.

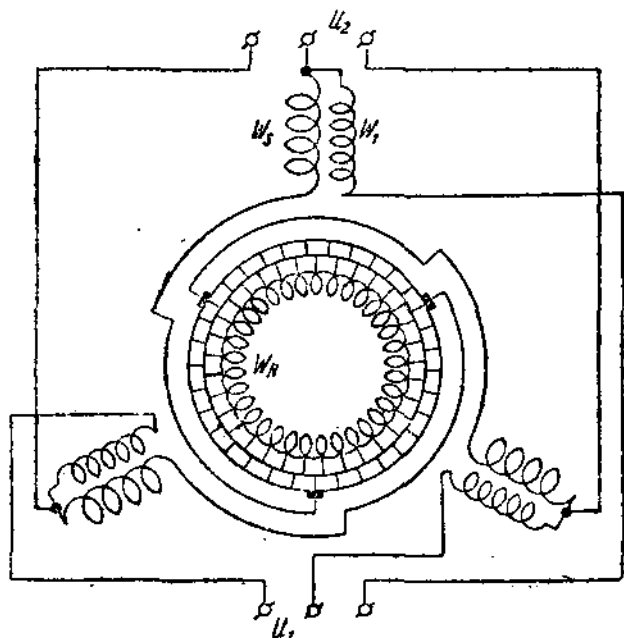


Рис. 62.

Следует отметить, что в схемах по рис. 61 и 62 благодаря электрическому соединению первичной и вторичной цепей будет иметь место поступление части мощности от ключа непосредственно в линию управления.

Это обстоятельство вызывает необходимость увеличения мощности ключа, что является существенным недостатком указанных схем.

Поэтому обычно электрического соединения первичной и вторичной цепей избегают.

55. Графическое изображение зависимости между электродвижущими силами генератора с возбуждением с ротора. На рис. 63 представлена графическая зависимость э. д. с. E_s , E_R и E_2 от частоты тока возбуждения и направления создаваемого им вращающегося магнитного

поля. Условия получения указанных зависимостей те же, что и при построении графиков для генератора с возбуждением со статора, а именно:

$$\Phi = \text{const}; n_0 = \text{const}.$$

Электродвижущая сила E_s определяется из выражения, которое графически изображено на рис. 63.

$$E_s = 4,44 \omega_s k_{ws} (f_0 \pm f_1) \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Знак плюс при f_1 соответствует направлению вращения магнитного потока в направлении вращения ротора, знак минус соответствует обратному направлению вращения потока. При вращении поля и ротора в разные стороны в пределах изменения частоты возбуждения от $f_1 = 0$ ($n_1 = 0$)

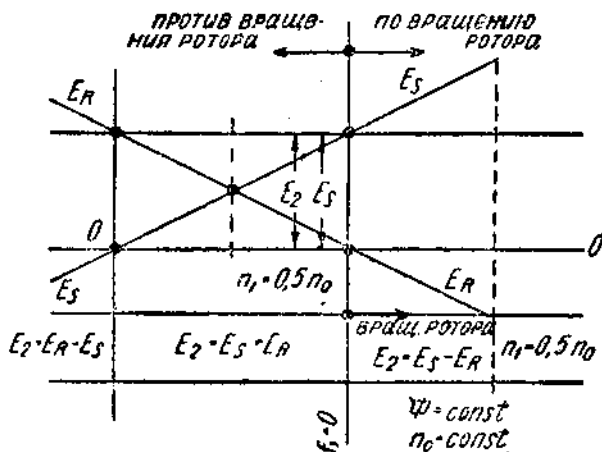


Рис. 63.

до $f_1 = f_0$ ($n_1 = n_0$), как видно из рис. 63, э. д. с. E_s и E_R складываются, при всех других случаях указанные э. д. с. вычитаются. Вторичная э. д. с. генератора равна:

$$E_2 = E_s - E_R = 4,44 \omega_s k_{ws} (f_0 \pm f_1) \Phi \cdot 10^{-8} - 4,44 \omega_R k_{wR} (\pm f_1) \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Следует подчеркнуть, что величина вторичной э. д. с. генератора при возбуждении с ротора, так же как и при возбуждении со статора, пропорциональна только числу оборотов n_0 и магнитному потоку и не зависит от числа периодов тока возбуждения. Число периодов главной цепи в этом случае зависит не только от числа периодов возбуждения, но и от числа оборотов ротора коллекторного генератора.

На табл. VI приведена сводка основных данных коллекторного генератора обоих типов возбуждения при различных соотношениях между скоростями и направлениями вращения поля и ротора генератора.

ТАБЛИЦА VI

Направление вращения поля и скорость его относительно n_0	Возбуждение со статора					Возбуждение с ротора						
	E_S	E_R	E_2	f_2	Порядок сле- дов. фаз по от- нош. вращен. потопля	Аналогия с какой- либо элек- трич. машиной	E_S	E_R	E_2	f_2	Порядок сле- дов. фаз по от- нош. вращен. потопля	Аналогия с какой-либо электрич. машиной
$n_1 > n_0$	$\equiv n_1$	$\equiv n_1 - n_0$	$E_S - E_R$	f_1	↻	Асинхрон. двиг.	$\equiv n_1 + n_0$	$\equiv n_1$	$E_S - E_R$	$f_1 + f_0$	↻	Преобразо- ват. част.
$n_1 = n_0$	$\equiv n_0$	0	E_S	f_0	↻	Холост. ход. Асинхрон. генер.	$\equiv 2n_0$	$\equiv n_0$	E_R	$2f_0$	↻	Т о ж е
$n_1 < n_0$	$\equiv n_1$	$\equiv n_0 - n_1$	$E_S + E_R$	f_1	↻	Асинхрон. генер.	$\equiv n_1 + n_0$	$\equiv n_1$	$E_S - E_R$	$f_1 + f_0$	↻	Т о ж е
$n_1 = 0$	0	$\equiv n_0$	E_R	0	—	Генер. по- стоян. тока	$\equiv n_0$	0	E_S	f_0	↻	Синхрон. генер.
$n_1 < n_0$	$\equiv n_1$	$\equiv n_1 + n_0$	$E_S - E_S$	f_1	↻	Тормоз	$\equiv n_0 - n_1$	$\equiv n_1$	$E_S + E_R$	$f_0 - f_1$	↻	Преобразо- ват. част.
$n_1 = n_0$	$\equiv n_0$	$\equiv 2n_1$	E_S	f_0	↻	"	0 $\equiv$	n_0	E_R	0	—	Однофазн. преобр. п. р. тока в пост.
$n_1 > n_0$	$\equiv n_1$	$\equiv n_1 + n_0$	$E_R - E_S$	f_1	↻	"	$\equiv n_1 - n_0$	$\equiv n_1$	$E_R - E_S$	$f_1 - f_0$	↻	Преобразо- ват. част.

Направле-
ния враще-
ния поля и
ротора сов-
падают

Поле относ.
обм. возб.
неподвижно

Направле-
ния враще-
ния поля и
ротора раз-
личны

Если сравнить генераторы обоих типов возбуждения, то можно отметить, что, например, при возбуждении со статора в случае частоты возбуждения $f_1 = 0$ коллекторный генератор работает как генератор постоянного тока ($f_2 = 0$), в то время как при возбуждении с ротора и $f_1 = 0$ мы получим режим синхронного генератора. Для того, чтобы при последнем типе возбуждения получить $f_2 = 0$, необходимо подать на ротор ток возбуждения частоты $f_1 = f_0$ с направлением вращения магнитного поля в сторону противоположную вращению ротора. Приведенные в таблице аналогии с различными электрическими машинами отдельных режимов работы коллекторного генератора относятся лишь к вопросу преобразования частоты и индуктирования в обмотках статора и ротора э. д. с., энергетическая же сторона работы коллекторного генератора и указанных электрических машин не имеет подобной аналогии, так как коллекторный генератор является по принципу своего действия чистым генератором, а не преобразователем того или иного типа, с которым проводится аналогия лишь по отмеченному выше вопросу.

Надлежит указать, хотя это и не имеет прямого касательства к разбираемому вопросу, что рассматриваемая коллекторная машина Костенко — Япольского может работать и в режиме двигателя, т. е., как и всякая электрическая машина обладает принципом обратимости.

II. РАЗЛИЧНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОЛЛЕКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА.

56. Общие замечания. При рассмотрении соотношения э. д. с. E_S, E_R и E_2 мы исходили из положения, что при любой частоте возбуждения поток Φ оставался неизменным. В этом случае и величина E_2 при $n_0 = \text{const}$ также оставалась постоянной. Теперь надлежит выяснить, каков должен быть режим возбудителя, чтобы имели место указанные соотношения.

Ранее было отмечено, что в компенсированном полностью коллекторном генераторе при всех режимах работы цепь возбуждения генератора работает подобно трансформатору или асинхронному двигателю, работающим вхолостую. Если пренебречь сначала падением напряжения в обмотке возбуждения W_1 , то можно написать, что $U_1 = E_1$, где U_1 — напряжение возбудителя, а E_1 — обратная э. д. с. обмотки возбуждения. Ее величина, как в обычном индукционном аппарате при синусоидальном напряжении и вращающемся магнитном поле равна: $E_1 = 4,44 \omega_1 k_{w1} f_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8}$ В.

Очевидно, что при $U_1 = \text{const}$ и изменении частоты будет меняться обратно пропорционально ей и величина потока Φ , т. е.

$$\Phi = \frac{E_1}{4,44 \omega_1 k_{w1} f_1 \cdot 10^{-8}} \cong \frac{U_1}{4,44 \omega_1 k_{w1} f_1 \cdot 10^{-8}} = \frac{U_1}{c \cdot f_1}.$$

Таким образом, величина потока возбуждения определяется напряжением и частотой на зажимах обмотки возбуждения. Очевидно, для получения $\Phi = \text{const}$ при $f = \text{var}$ необходимо изменять напряжение U_1 на зажимах возбуждения пропорционально изменению частоты f_1 .

Вообще же регулировку величины потока в зависимости от частоты можно производить по любому закону путем соответственного изменения с частотой f_1 и первичного напряжения на зажимах обмотки возбуждения коллекторного генератора.

Благодаря этому можно установить любую зависимость между э. д. с. E_2 на главных зажимах генератора и числом периодов f_2 рабочей цепи.

Указанная зависимость стоит в связи с наивыгоднейшим режимом работы управляемого синхронного двигателя и характером изменения рабочего момента на его валу при изменении частоты питающего двигателя тока. Ранее нами указывалось, что для соблюдения наивыгоднейших условий работы синхронного двигателя (постоянство коэффициента мощности и поддержания опрокидывающего момента в допустимых пределах) при меняющейся частоте необходимо наличие соотношения:

$$\frac{E_2'}{E_2''} = \frac{f_2'}{f_2''} \sqrt{\frac{M'}{M''}}.$$

В дальнейшем будет рассмотрена работа синхронного двигателя при меняющейся частоте. Сейчас же надлежит установить зависимость между E_2 и f_2 для различных наиболее характерных режимов работы привода с регулируемой скоростью.

Для синхронной передачи самым характерным режимом является работа двигателя с постоянным моментом на валу при меняющейся скорости от нуля до некоторого максимума. Примерное постоянство момента обуславливается тем, что вал синхронного двигателя сцеплен с определенным рабочим механизмом, являющимся для него неизменной нагрузкой.

В этом случае приведенная выше формула примет такой вид:

$$\frac{E_2'}{E_2''} = \frac{f_2'}{f_2''},$$

так как $M = \text{const}$.

Регулирование возбуждения должно производиться так, чтобы пропорционально изменению частоты f_2 происходило изменение э. д. с. E_2 генератора.

Второй режим работы двигателя — работа при моменте на валу, обратно пропорциональном числу оборотов, т. е. числу периодов f_2 питающего двигателя тока

$$M = \frac{k}{f_2}.$$

При этом мощность, отдаваемая двигателем, остается постоянной (подобный случай характерен для работы по тяге, подъему и т. д.).

Подставляя значение момента в общую формулу устойчивой работы двигателей, получим

$$\frac{E_2'}{E_2''} = \frac{f_2'}{f_2''} \sqrt{\frac{k}{f_2'} \cdot \frac{f_2''}{k}} = \sqrt{\frac{f_2'}{f_2''}}.$$

Следовательно, напряжение коллекторного генератора должно изменяться пропорционально корню квадратному из частоты f_2 :

$$E_2 = c \cdot \sqrt{f_2}.$$

Наконец, третий, могущий иметь место режим работы двигателя — это работа двигателя при моменте на валу пропорциональном квадрату числа оборотов. Подобный случай может встретиться при приводе гребных ко- рабельных винтов, вентиляторов и т. п.:

$$M = k f_2^2.$$

Подставляя таким же образом, как выше, частное значение M в общую формулу устойчивой работы двигателя, получим:

$$\frac{E_2'}{E_2''} = \frac{f_2'^2}{f_2''^2}.$$

Таким образом, регулирование возбуждения генератора в этом случае должно производиться так, чтобы напряжение генератора было пропорционально квадрату частоты питающего синхронный двигатель тока:

$$E_2 = c f_2^2.$$

57. Случай I. Работа двигателя при постоянном моменте на валу. Как уже отмечалось, для устойчивой и экономичной работы синхронного двигателя при

меняющейся частоте и $M = \text{const}$ необходимо соблюдение условия $E_2 \equiv f_2$, для чего необходимо иметь при $n_0 = \text{const}$ $\Phi \equiv f_2$. Для поддержания $\Phi = \text{const}$ необходимо, чтобы $U_1 \equiv E_1 \equiv f_1$, что было установлено ранее. Теперь же для $\Phi \equiv f_2$ нужно изменять $U_1 \equiv E_1$ пропорционально не первой степени частоты, а пропорционально квадрату частоты, т. е. $U_1 \equiv E_1 \equiv f_1^2$.

На рис. 64 представлены кривые изменения E_s , E_R и E_2 в зависимости от $f_2 = f_1$ в коллекторном генераторе с возбуждением со статора. Обмотка статора W_s наложена на ту же магнитную систему, что и обмотка W_1 возбуждения и

неподвижна относительно последней. Поэтому кривая $E_s \equiv E_1 \equiv f_1^2$ является квадратичной кривой. При $\Phi = \text{const}$ и $E_2 = \text{const}$ э. д. с. статора была пропорциональна первой степени f_1 (рис. 57).

Электродвижущая сила ротора E_R , как было установлено ранее, равна
но так как $\Phi \equiv f_1$, то

$$E_R = k_1 (\pm f_1 - f_0) \Phi,$$

$$E_R = k (\pm f_1 - f_0) f_1.$$

При вращении поля по направлению вращения ротора и при $f_1 = f_0$ э. д. с. E_R равна нулю, а $E_2 = E_s \equiv \Phi \cdot f_0 \equiv f_0^2$. По рис. 64 в случае

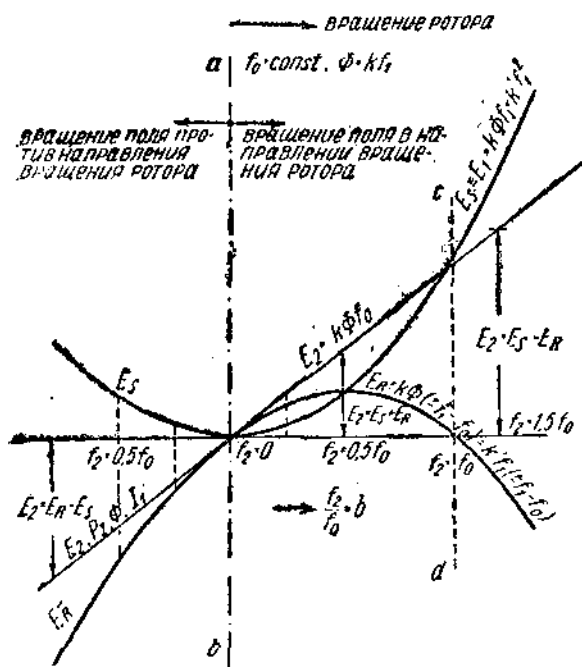


Рис. 64.

$f_2 = f_1 = 0$ (постоянный ток) вторичная результирующая э. д. с. E_2 также равна нулю. В действительности такая регулировка для синхронной передачи является неприемлемой, так как и при $f_2 = 0$ должна оставаться на зажимах генератора некоторая минимальная э. д. с. E_2 постоянного тока, чтобы при положении покоя двигателей ($f_2 = 0$) обеспечить синхронизирующие токи в их обмотках, удерживающие роторы указанных двигателей в неизменном положении.

Следовательно, регулировка э. д. с. E_2 на зажимах генератора должна производиться таким образом, чтобы $E_2 = E_{2n} + k f_2$, где E_{2n} — значение э. д. с. E_2 при постоянном токе ($f_2 = 0$). Способы регулирования возбуждения с учетом отмеченных выше условий будут приведены ниже.

Обращаясь вновь к рис. 64, дающему теоретические зависимости э. д. с. генератора от $f_1 = f_2$, отмечаем, что при вращении поля в направлении вращения ротора максимальное значение э. д. с. ротора E_R при регулировании f_1 в пределах $f_1 = 0$ до $f_1 = f_0$ наступает при значении f_1 равном половине от f_0 . Подставляя значение $f_1 = \frac{f_0}{2}$ в выражение для E_R , имеем

$$E_R = k' (\pm f_1 - f_0) f_1 = -k' \frac{f_0^2}{4}.$$

Знак минус свидетельствует о том, что поток Φ пересекает обмотку ротора в обратном направлении по сравнению с пересечением обмотки статора. Следовательно, при $f_1 = \frac{f_0}{2}$ э. д. с. E_S и E_R должны складываться, как это и изображено на рис. 64.

Выше было установлено, что при $f_1 = f_0$ э. д. с. $E_2 = k' f_0^2$. Поэтому $E_{R\max} = \frac{1}{4} E_{2c}$, где E_{2c} — значение э. д. с. E_2 при синхронном вращении поля статора и обмотки ротора. Если изменение числа периодов $f_2 = f_1$ идет далее значения f_0 , т. е. $f_2 > f_0$, то E_R достигает значения $\frac{1}{4} E_{2c} = k' \frac{f_0^2}{4}$ при значении f_2 , равном $f_2 = 1,21 f_0$, что может быть определено из выражения для E_R .

В случае возбуждения с ротора при работе двигателя с постоянным моментом на валу кривые э. д. с. E_S , E_R и E_2 останутся такими же, как и при возбуждении со статора (рис. 64), однако изменяется значение для отдельных соотношений э. д. с. E_S и E_R . Так, при $f_2 = f_0$ в случае возбуждения со статора f_1 также равнялось f_0 , теперь же f_1 должно быть равно нулю (постоянный ток).

Тогда так же, как и выше, $E_S = E_2 = k' f_0^2$. Наоборот, при $E_2 = 0$ или практически минимальному значению $f_1 = f_0$, причем направление вращения поля противоположно вращению ротора (однокорный преобразователь переменного тока в постоянный).

Таким образом, линия ab на рис. 64 при возбуждении со статора, в случае использования кривых этого рисунка для генератора с возбуждением с ротора, должна быть передвинута в положение cd , причем вправо по чертежу от нее расположатся кривые, соответствующие вращению поля в направлении вращения ротора, а влево — кривые при взаимно противоположном вращении.

Весьма интересно отметить, что в случае возбуждения с ротора при больших частотах в главной цепи ($f_2 = f_0$ и более) частота э. д. с. ротора

равна или нулю или имеет небольшое значение. Следовательно, для создания требуемого потока в генераторе напряжение в цепи возбуждения должно быть невелико (теоретически при $f_2 = f_0$ частота f_1 равняется нулю). При возбуждении же со статора при больших частотах в главной цепи частота возбуждения также должна быть велика, так как $f_1 = f_2$, что требует для создания того же потока значительно большего напряжения в цепи возбуждения, чем при возбуждении с ротора. Отсюда а priori можно заметить, что в последнем случае мощность возбуждения в вольтамперах должна быть меньше, чем в первом случае. В случае возбуждения с ротора кривая напряжения возбудителя U_1 практически будет совпадать с кривой E_R , а при возбуждении со статора кривая напряжения U_1 совпадает с кривой E_s .

Следует отметить, что по той же прямой (в соответствующем масштабе, конечно), по которой изменяется э. д. с. E_2 , будет изменяться также отдаваемая мощность P_2 (момент на валу неизменен, а скорость вращения двигателей изменяется пропорционально f_2), поток Φ и ток намагничивания (I_m при ненасыщенной магнитной системе).

58. Учет падения напряжения в обмотке возбуждения коллекторного генератора. Кривые рис. 64 построены в предположении, что обмотка возбуждения генератора не имеет индуктивного и активного сопротивления, благодаря чему в ней нет падения напряжения и $U_1 = E_1$.

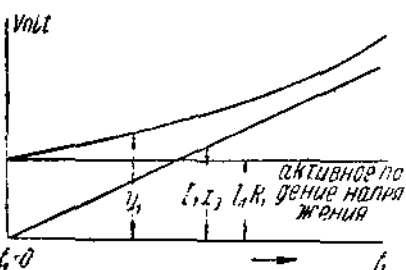


Рис. 65.

Кроме того, не было учтено то обстоятельство, что при $f_2 = 0$ э. д. с. E_2 должна иметь некоторое конечное (минимальное) значение, а не равняться нулю.

Рассмотрим наиболее простой случай, при котором E_2 остается постоянным при всех значениях частоты f_2 . (Следует отметить, что $\Phi = \text{const}$; генератор имеет возбуждение со статора).

При возбуждении постоянным током ($f_1 = f_2 = 0$) в рабочей цепи также

имеем постоянный ток. В цепи возбуждения коллекторного генератора, так же, как и в обмотке возбуждения генератора постоянного тока, имеет место только активное сопротивление и, следовательно, активное падение напряжения $I_1 R_1$. В дальнейшем при увеличении частоты от нулевого значения возникают обратная э. д. с. E_1 и индуктивное падение напряжения. Величина последнего при неизменном токе в цепи возбуждения зависит от частоты тока возбуждения. Условие постоянства потока требует при меняющейся частоте соответственного увеличения приложенного напряжения. Следовательно, в данном случае и обратная э. д. с. будет зависеть по своей величине только от частоты тока возбуждения. Если пренебречь активной составляющей намагничивающего тока, то индуктивное падение напряжения или, вернее, составляющую приложенного напряжения, компенсирующую индуктивное падение напряжения, и обратную э. д. с. можно арифметически сложить и учитывать вместе как общее индуктивное падение напряжения $I_1 x_s$, где x_s — эквивалентное индуктивное сопротивление. Активное падение напряжения остается практически неизменным при всех значениях частоты возбуждения f_1 .

Таким образом, необходимое для создания неизменного потока Φ напряжение при данной частоте определится как геометрическая сумма $I_1 R_1$ и $I_1 x_s$.

На рис. 65 представлены кривые $I_1 x_2$, $I_1 R_1$ и U_1 в зависимости от частоты тока возбуждения. При пренебрежении активным сопротивлением обмотки возбуждения имели бы ранее установленную зависимость для $\Phi = \text{const } U_1 \equiv f_1$. Подобным же образом могут быть получены кривые с учетом падения напряжения и для других режимов регулирования возбуждения (например при $\Phi \equiv f_2$ и $E_2 \equiv f_2$).

Для рассмотрения принципиальных основных соотношений в коллекторном генераторе падением напряжения в обмотке возбуждения можно пренебречь.

59. Случай II. Работа двигателя при моменте на валу обратно пропорциональном числу оборотов. Ранее уже было установлено, что в этом случае ($M = \frac{k}{f_2}$ и $P_2 = \text{const}$) напряжение на зажимах коллекторного генератора должно изменяться пропорционально корню квадратному из частоты f_2 , т. е.

$$E_2 = c \sqrt{f_2}.$$

Характеристики двигателя, отвечающие наивыгоднейшим условиям его работы, будут разобраны ниже. Теперь же рассмотрим характеристики генератора.

Генератор будет работать при постоянной отдаваемой мощности $P_2 = \text{const}$.

$$\text{Э. д. с. } E_2 = E_S - E_R = k \Phi f_0 = c \sqrt{f_2}; \quad \Phi = c' \sqrt{f_2},$$

равно как и $I_1 \cong k'' \sqrt{f_2}$

(при ненасыщенной магнитной цепи). Очевидно, что ток в рабочей цепи

$$I_2 = \frac{K''}{\sqrt{f_2}}.$$

Электродвижущая сила обмотки статора E_s будет изменяться по следующей зависимости:

$$E_s \equiv f_2 \Phi \equiv f_2 \sqrt{f_2} = \sqrt{f_2^3}.$$

(Э. д. с. E_s , с одной стороны, изменяется за счет изменения числа оборотов магнитного поля, а с другой — за счет изменения потока Φ при изменении частоты).

Электродвижущая сила ротора E_R равна:

$$E_R = k (\pm f_1 - f_0) \Phi = k' (\pm f_1 - f_0) \sqrt{f_1}$$

или, так как $f_1 = f_2$ и направления вращения поля и ротора совпадают, выражение для E_R можно представить следующим образом:

$$E_R = -k (f_0 - f_2) \Phi = -k' (f_0 - f_2) \sqrt{f_2}.$$

При синхронном вращении поля и ротора ($f_2 = f_0$), как и ранее, $E_s = E$, а $E_R = 0$. Очевидно, что по условию при $f_2 = 0$ теоретически E_2 , так же, как и E_R и E_s , равна нулю. Если найти максимум кривой E_R , имеющий место в пределах $f_2 = f_1 = 0$ и $f_2 = f_1 = f_0$, то окажется, что максимальное значение для E_R наступает при $f_2 = \frac{1}{3} f_0$.

При возбуждении со статора обратной э. д. с. обмотки возбуждения E_1 , равно как и приложенное напряжение U_1 , для осуществления условия $E_2 \equiv f_2^2$ должна изменяться пропорционально кубу частоты возбуждения $f_1 = f_2$, так как для поддержания $\Phi = \text{const}$ необходимо, чтобы $E_1 \equiv f_1 = f_2$. В данном же случае, так как $\Phi \equiv f_2^2$, то $E_1 \equiv f_1^3 = f_2^3$.

Э. д. с. ротора E_R и в данном случае определяется так же, как и ранее:

$$E_R = -k (f_0 - f_2) \Phi = -k' (f_0 - f_2) f_2^2.$$

На рис. 67 изображены характеристики коллекторного генератора с возбуждением со статора при работе двигателей с моментом $M \equiv f_2^2$.

При $f_2 = 0$ теоретически E_S , E_R и E_2 равны нулю. При $f_2 = f_0$ имеем:

$$E_S = E_2 \equiv f_0^3; E_R = 0.$$

Максимум E_R в пределах $f_2 = 0$ до $f_2 = f_0$ наступает при $f_2 = \frac{2}{3} f_0$.

В этом случае

$$\begin{aligned} E_{R\text{max}} &= -k' (f_0 - \\ &- f_2) f_2^2 = \frac{4}{27} E_{2c} = \\ &= 0,148 E_{2c}. \end{aligned}$$

Это же значение E_R имеет место при $f_2 > f_0$, а именно, когда $f_2 = 1,12 f_0$.

Так же, как и в первых двух случаях, характеристики рис. 67 соответствуют работе генератора и в случае возбуждения его с ротора. Однако значение $f_2 = 0$ будет соответствовать величине $E_2 = E_{2c} \equiv f_0^3$. Влево по чертежу эти же характеристики будут иметь место при вращении поля и ротора в разные стороны.

Следует подчеркнуть, что при возбуждении со статора напряжение U_1 возбудителя должно быть пропорционально f_2^3 , а при возбуждении с ротора напряжение U_1 будет пропорционально $(f_0 - f_2) f_2^2$, причем в первом случае кривые э. д. с. U_1 и E_S будут практически совпадать, а во втором совпадать будут кривые U_1 и E_R . Кроме того, частота возбуждения при одной и той же частоте f_2 и величине E_2 в обоих случаях окажется весьма различной.

Так, например, при э. д. с. $E_2 = 1,12^3 E_{2c}$ (см. рис. 67) и частоте $f_2 = 1,12 f_0$ при возбуждении со статора частота $f_1 = 1,12 f_0$ и приведенное ко вторичной цепи значение обратной э. д. с. возбуждения $E_1' = 1,12^2 E_{2c}$. При возбуждении же с ротора для этих же значений E_2 и

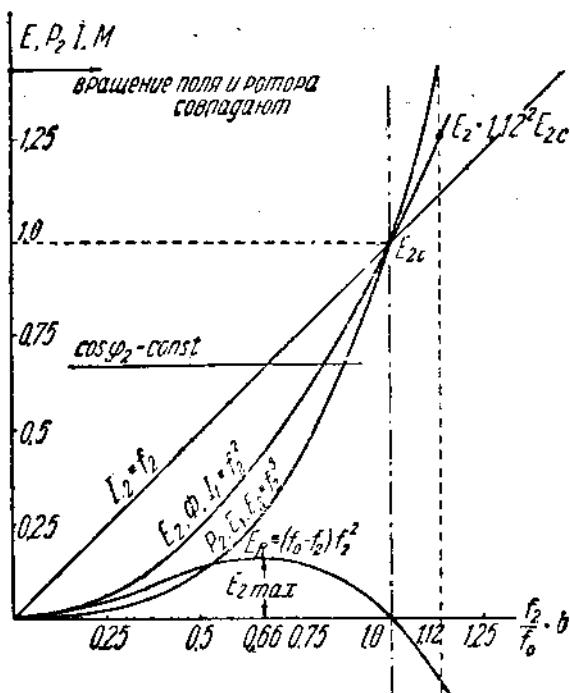


Рис. 67.

f_2 частота возбуждения $f_1 = 0,12 f_0$, а приведенная ко вторичной цепи обратная э. д. с. цепи возбуждения $E_1' = E_R = 0,148 E_{2c}$. Благодаря этому мощность возбуждения в вольтамперах при возбуждении с ротора и в этом случае будет меньше, чем при возбуждении со статора.

61. Выбор возбудителя и работа его при различных режимах работы коллекторного генератора. Синхронные двигатели, работающие от коллекторного генератора, вообще могут иметь, как уже отмечалось, самые различные зависимости момента на валу от числа оборотов. Для невыгоднейших условий работы указанных двигателей необходимо соответственным образом при изменении частоты менять напряжение на зажимах генератора путем изменения величины потока Φ , для чего надлежит изменять напряжение U_1 возбудителя в соответствии с частотой f_1 .

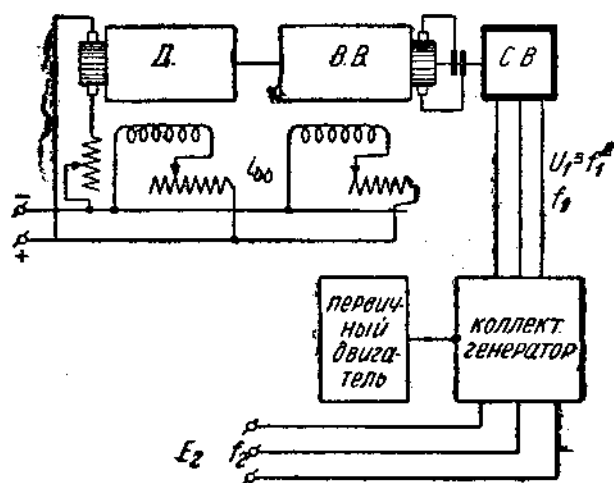


Рис. 68.

Выше были установлены для наиболее характерных режимов работы коллекторного генератора зависимости между U_1 и f_1 . В частности, например, если нужно иметь $E_2 = \text{const}$, то поток Φ также должен поддерживать постоянным, что возможно лишь при изменении U_1 приблизительно пропорционально f_1 . Если возбудителем служит

синхронный генератор, то достаточно изменять скорость синхронного возбудителя, не меняя ток в его обмотке возбуждения.

Если при возбуждении со статора напряжение на зажимах коллекторного генератора должно быть пропорционально числу периодов $U_2 \cong E_2 \cong f_2$, то напряжение U_1 должно изменяться пропорционально f_1^2 . В этом случае достаточно изменять скорость синхронного возбудителя (С. В. рис. 68), на одном валу с которым находится небольшой возбудитель В. В. постоянного тока с независимым возбуждением ($i_{bb} = \text{const}$). Для вращения агрегата из указанных двух возбудителей служит двигатель постоянного тока Д с широкой регулировкой скорости. При увеличении скорости синхронного возбудителя С. В. напряжение на его зажимах будет возрастать, во-первых, благодаря увеличению числа пересечений магнитных линий в единицу времени (пропорционально f_1) и, во-вторых, за счет увеличения тока его возбуждения (пропорционально f_1).

Таким образом, напряжение на зажимах возбудителя будет изменяться пропорционально f_1^2 . В случае необходимости установить какой-либо иной закон изменения напряжения U_1 от числа периодов f_1 достаточно питать возбуждение синхронного возбудителя от независимой цепи постоянного тока, сила тока которой изменяется при помощи реостата, регулируемого

центробежным регулятором, соединенным с осью синхронного возбудителя (рис. 69). Подбирая соответствующим образом сопротивления секций реостата, можно получить любой закон изменения потока синхронного возбудителя, а следовательно, и напряжения U_1 от числа периодов f_1 . Указанный синхронный возбудитель переменной частоты по типу синхронного генератора более применим при возбуждении коллекторного генератора с ротора (рис. 69), так как при возбуждении со статора для частоты $f_2 = 0$ (положение покоя роторов синхронных двигателей при строго фиксированной установке осей их) необходим в цепи возбуждения постоянный ток ($f_1 = 0$), чего нельзя получить от синхронного возбудителя.

Вообще для возбуждения коллекторного генератора может быть применен любой наиболее подходящий в данном конкретном случае источник переменной частоты из источников, рассмотренных выше. Так, в частности, можно применить источник переменной частоты по типу генератора постоянного тока с вращающимися по коллектору щетками (см. § 30). В этом случае для получения, например, зависимости $U_1 = f_1$ нужно на ось вращающейся траверзы со щетками посадить дополнительный возбудитель с независимым возбуждением (генератор постоянного тока), который питал бы одну из двух обмоток главного возбудителя, вращаемого с неизменной скоростью и имеющего вторую обмотку возбуждения, включенную на независимый источник тока и предназначенную обеспечивать напряжение постоянного тока на коллекторе возбудителя при остановке щеток и вместе с ними и вспомогательного возбудителя. При возбуждении со статора коллекторного генератора последний при неподвижных щетках на коллекторе возбудителя будет давать постоянный ток, фиксирующий оси управляемых синхронных двигателей в определенном положении, соответствующем положению щеток на коллекторе возбудителя.

Для получения других зависимостей $U_1 = f(f_1)$ можно вращать с переменной скоростью не только щетки со вспомогательным возбудителем, но и главный возбудитель, или применить регулирование в цепи возбуждения возбудителя при помощи центробежного регулятора или центробежных контактов, производящих при определенных скоростях щеток с достаточ-

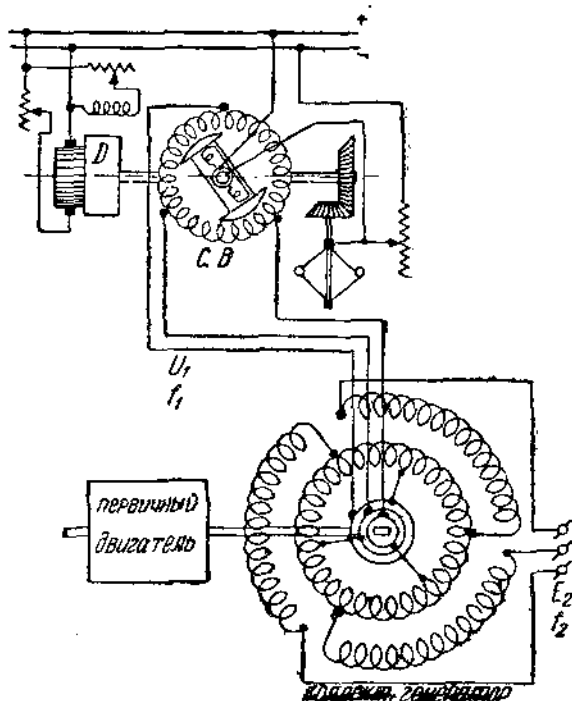


Рис. 69.

ной степенью точности замыкание накоротко отдельных секций регулируемого реостата в цепи возбуждения возбудителя для получения заранее установленной зависимости U_1 от f_1 .

Кроме того, в качестве возбудителей могут быть применены также источники переменной частоты типа тиратронов с соответствующим компаундирующим устройством для получения требуемых характеристик возбудителя.

В качестве возбудителя может быть также применен и коллекторный генератор соответственно меньшей мощности, сидящий на одном валу с основным коллекторным генератором и возбуждаемый в свою очередь каким-либо источником переменной частоты простейшего типа (ключ Маругина и т. п.).

Последний тип, например ключ Барбье-Бенара, можно применить и в качестве самостоятельного возбудителя для коллекторного генератора, путем включения в его цепь автоматически регулируемого сопротивления для получения от возбудителя требуемых характеристик.

Следует отметить, что как в отношении выбора возбудителей, так и в отношении способов их регулирования возможен целый ряд решений, причем применение того или иного варианта зависит от мощности возбудителя, режима работы генератора, рода возбуждения его, степени точности регулирования, экономических соображений и т. п.

В ряде случаев зависимость $U_1 = f(f_1)$, особенно при небольших мощностях синхронных двигателей, может довольно сильно уклоняться от ее значения, необходимого по соображениям наивыгоднейшей работы двигателей. В частности она может принять простейший вид $U_1 \equiv f_1$. Возможно также применение последнего вида зависимости и при значительных мощностях управляемых, синхронных двигателей, но с соответственной регулировкой их тока возбуждения.

III. МОЩНОСТЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА.

62. Роль компенсирующей обмотки W_S . До сих пор мы полагали, что генератор работает вхолостую, и поэтому не занимались энергетической стороной работы генератора, равно как и величиной мощности его возбуждения. Как было установлено выше, вторичная обмотка статора W_S , будучи соединена через коллектор и щетки со вторичной обмоткой ротора W_R , способствовала получению при любой частоте возбуждения э. д. с. E_2 на зажимах генератора пропорциональной числу оборотов генератора и потоку возбуждения. Однако указанная обмотка W_S , называемая компенсирующей обмоткой, имеет весьма большое значение и в энергетическом отношении.

Ранее было установлено, что при положении покоя ротора результирующая э. д. с. E_2 оказывалась равной нулю. Это обстоятельство может иметь место лишь при полной идентичности обмоток статора и ротора (вторичных обмоток). Так как э. д. с. обеих обмоток при покое ротора равны и противоположны друг другу, то можно сказать, что обмотка статора W_S представляет собой зеркальное изображение обмотки ротора W_R , что является основной чертой компенсирующей обмотки, применяемой в различных электрических машинах переменного или постоянного тока.

Назначение компенсирующей обмотки — компенсировать поле реакции якоря (например, компенсирующая обмотка в машинах постоянного тока),

т. е. устранить воздействие явлений, происходящих в якоре, на основной поток и через него на цепь возбуждения вообще. Если бы в рассматриваемом коллекторном генераторе не было компенсирующей обмотки, то он при покое ротора работал бы как трансформатор с вращающимся магнитным полем (индукционный регулятор), в котором мощность трансформаторно передается из первичной обмотки во вторичную, причем величина ее зависит от величины нагрузки во вторичной цепи. При наличии компенсирующей обмотки и покое ротора ток нагрузки равен нулю, так как $E_2 = 0$. В этом случае можно вполне определенно констатировать, что мощность в киловольт-амперах, поступающая в обмотку W_1 , равна мощности, необходимой для намагничивания генератора, т. е. мощности аналогичной мощности холостого хода трансформатора. Величина этой мощности, составляет всего лишь несколько процентов от полной мощности генератора и определяет собой мощность ключа-возбудителя.

При вращении генератора, как было выяснено ранее, результирующая э. д. с. E_2 вырабатывается лишь за счет вращения ротора с числом оборотов n_0 ($E_2 \equiv n_0$). Следовательно, мощность, отдаваемая генератором, покрывается первичным двигателем, а не цепью возбуждения, которая доставляет лишь намагничивающую мощность (реактивную мощность), неизменную при неизменном потоке возбуждения генератора.

Коллекторный генератор можно рассматривать как комбинацию трансформатора с одной первичной обмоткой W_1 , двумя вторичными обмотками W_S и W_R и генератора переменного тока.

Роль компенсирующей обмотки заключается в том, чтобы поддерживать для указанного трансформатора (цепь возбуждения) режим холостого хода при всех условиях работы генератора, т. е. чтобы из цепи возбуждения поступала лишь реактивная мощность на намагничивание трансформатора.

Допустим, что в генераторе имеет место неполная компенсация, т. е.

$$w_s k_{ws} \neq w_R k_{wR}.$$

Тогда известное уже выражение для E_2 при возбуждении со статора

$$E_2 = E_S - E_R = 4,44 w_s E_{ws} (\pm f_1) \Phi \cdot 10^{-8} - \\ - 4,44 w_R k_{wR} (\pm f_1 - f_0) \Phi \cdot 10^{-8} V$$

может быть представлено как сумма двух э. д. с.:

$$E_2 = 4,44 w_R k_{wR} \Phi f_0 \cdot 10^{-8} + 4,44 (w_s k_{ws} - \\ - w_R k_{wR}) (\pm f_1) \Phi \cdot 10^{-8} = E_B + E_T.$$

Следовательно, в данном случае э. д. с. E_2 складывается из двух э. д. с., из которых э. д. с. E_B представляет собой э. д. с. вращения (э. д. с. генератора), зависящую только от механической скорости ротора и величины магнитного потока Φ . Вторая э. д. с. E_T является трансформаторной э. д. с., созданной трансформатором с первичной обмоткой w_1 и вторичной комбинированной обмоткой ($w_s k_{ws} - w_R k_{wR}$).

При вполне компенсированном генераторе $w_s k_{ws} = w_R k_{wR}$ и $E_T = 0$. Полная внутренняя мощность одной фазы коллекторного генератора равна $P_2 = E_2 I_2 \cos \psi_2$, где I_2 — ток нагрузки (ток, поступающий в управляемые двигатели), а ψ_2 — угол сдвига фаз между э. д. с. E_2 и

током I_2 , зависящий от состояния возбуждения управляемых синхронных двигателей и параметров генератора.

Указанная мощность на фазу может быть представлена, так же как и э. д. с. E_2 , состоящей из двух частей:

$$P_2 = (E_B + E_T) I_2 \cos \psi_2 = P_B + P_T.$$

Часть P_B мощности P_2 представляет собой мощность, выработанную первичным двигателем, вращающим коллекторный генератор. Вторая же часть ее P_T является трансформаторной мощностью, проходящей через цепь возбуждения. Таким образом, если генератор не имеет полной компенсации, то мощность возбудителя необходимо увеличить, так как он должен рассчитываться уже на мощность возбуждения и трансформаторную мощность P_T .

При полной компенсации $P_T = 0$, т. е. $E_T = 0$. Поэтому в последнем случае при всех режимах работы генератора возбуждающая система будет доставлять лишь намагничивающий реактивный ток и мощность, соответствующую потерям на возбуждение машины при данном числе периодов. При возбуждении с ротора результирующая э. д. с. генератора равна

$$E_2 = 4,44 [\omega_s k_{ws} (f_0 \pm f_1) - \omega_R k_{wR} (\pm f_1)] \Phi \cdot 10^{-8}$$

или

$$E_2 = 4,44 \omega_s k_{ws} f_0 \Phi \cdot 10^{-8} + 4,44 (\omega_s k_{ws} - \omega_R k_{wR}) (\pm f_1) \Phi \cdot 10^{-8} = E_B + E_T,$$

где так же, как и при возбуждении со статра E_B — э. д. с. вращения, а E_T — трансформаторная э. д. с. равная нулю при полностью компенсированном коллекторном генераторе. Полная внутренняя мощность и в этом случае также состоит из двух частей:

$$P_2 = (E_B + E_T) I_2 \cos \psi_2 = P_B + P_T.$$

Следует отметить, что если $\omega_s k_{ws} > \omega_R k_{wR}$ и поле возбуждения вращается в ту же сторону, что и ротор, т. е. f_1 имеет знак плюс, то мощность P_T доставляется возбуждающей системой в главную вторичную цепь. При $+f_1$ и $\omega_s k_{ws} < \omega_R k_{wR}$, наоборот, мощность P_T доставляется первичным двигателем и посылается в возбуждающую систему. В случае $-f_1$, т. е. при вращении поля и ротора в разные стороны, имеют место обратные соотношения.

Таким образом, при отсутствии полной компенсации в генераторе возбуждающая система должна пропускать не только мощность возбуждения, но и трансформаторную мощность P_T , что скажется на размерах возбудителя. Поэтому наиболее выгодным случаем является случай полной компенсации генератора. Если такой компенсации нет, то при замыкании генератора на некоторую нагрузку вторичный ток, как в обычном трансформаторе, создает ампервитки, которые должны быть уравновешены ампервитками, возникающими в первичной обмотке, что обуславливает передачу мощности из первой цепи во вторую.

При наличии компенсирующей обмотки ампервитки одной вторичной обмотки (обмотка ротора) полностью уничтожаются ампервитками другой вторичной обмотки (компенсирующей обмотки), благодаря чему нагрузка

в статоре может быть обозначен через I_S' , а в роторе — I_2' . Направление их, благодаря соответственной установке щеток, прямо противоположно (при сдвиге $\beta = 180^\circ$). Благодаря этому в векторную диаграмму первичной обмотки генератора W_2 нужно внести векторы I_S' и I_R' , сдвинутые друг относительно друга на 180° . Ампервитки, ими создаваемые, компенсируют действие друг друга, и в обмотке W_1 будет циркулировать ток $I_1 = I_0$ (ток холостого хода).

63. Реактивная мощность возбуждения при возбуждении со статора. При возбуждении со статора отношение мощностей в вольтамперах возбуждения и главной цепи равно:

$$\gamma = \frac{m_1 E_1 I_1}{m_2 E_2 I_2}.$$

Приведем величины E_2 и I_2 главной цепи к цепи возбуждения, тогда

$$I_2' = I_2 \frac{m_2 \omega_R \cdot k_{wR}}{m_1 \omega_1 \cdot k_{w1}} \neq I_1,$$

так как мощности возбуждения и главной цепи не равны. (Эти мощности могут быть равны лишь при чисто трансформаторной работе генератора, что может иметь место, если он не полностью компенсирован и ротор неподвижен).

Обозначим отношение $\frac{I_1}{I_2'}$ через α ; отношение э. д. с. E_1 и E_2' равно $\frac{f_1}{f_0}$; так как

$$E_1 \equiv f_1, \text{ а } E_2' \equiv f_0.$$

Тогда величина γ может быть определена следующим образом:

$$\gamma = \frac{I_1}{I_2'} \cdot \frac{f_1}{f_0} = \alpha \cdot \frac{f_1}{f_0}.$$

В частности при $f_1 = f_0$ и совпадении направления вращения поля и ротора

$$\gamma = \frac{I_1}{I_2'} = \alpha.$$

Таким образом, в этом последнем случае отношение указанных мощностей, выраженных в вольтамперах, равно отношению намагничивающего тока к приведенному к обмотке возбуждения вторичному (рабочему) току I_2' .

Здесь может быть проведена аналогия с асинхронным генератором в отношении потребления намагничивающих вольтампер.

Если обратиться к общему выражению для величины γ , то можно констатировать, что при увеличении частоты возбуждения f_1 величина γ растет, т. е. возрастает реактивная мощность возбуждения.

При частоте возбуждения $f_1 = 0$ (возбуждение постоянным током) получим $\gamma = 0$.

Выражение для γ было установлено из отношения мощностей, в выражения для которых входили э. д. с., а не напряжения. Очевидно, что при $f_1 = 0$ обратная э. д. с. E_1 также равна нулю. Мощность, расходуемая

в этом случае в обмотке возбуждения, будет определяться силой тока I_2 и падением напряжения в обмотке возбуждения (т. е. приложенным напряжением). При условии постоянства потока мощность возбуждения здесь будет иметь наименьшее значение.

Если считать, что числу периодов $f_1 = f_0$ соответствует максимальная вторичная мощность, то расчетные мощности возбудителя и коллекторного генератора должны находиться в отношении $\gamma = \alpha$.

Величина α в асинхронном двигателе и генераторе, т. е. отношение намагничивающего тока к рабочему току, равно как и в коллекторном генераторе, зависит от конструкции машины и магнитных материалов, в ней примененных. В основном в ней сказывается величина приведенного воздушного зазора δ' (сюда входит сопротивление остальной части магнитной цепи), насыщение машины, линейная нагрузка, величина полюсного деления τ и индукция в воздушном зазоре.

Указанную величину α в компенсированном генераторе (отношение намагничивающего тока к рабочему току) можно принять колеблющейся так же, как и в асинхронных машинах, в пределах $0,2 \leq \alpha \leq 0,35$, т. е. намагничивающий ток составляет $20 \div 35\%$ от номинального тока нагрузки (в коллекторном генераторе приведенного к первичной цепи). Следовательно, и расчетная реактивная мощность в вольтамперах в коллекторном генераторе при возбуждении со статора и $f_{1\max}$ составляет $20 \div 35\%$ от мощности самого генератора.

64. Реактивная мощность возбуждения при возбуждении с ротора. Выше уже отмечалось, что при возбуждении с ротора мощность возбуждения в вольтамперах должна быть меньше, чем при возбуждении со статора.

Кроме того, при возбуждении с ротора величина расчетной мощности возбудителя будет определяться способом регулировки напряжения $U_2 \cong E_2$ генератора в зависимости от частоты f_2 , тока генератора, т. е. от вида функции:

$$E_2 = f(f_2).$$

Установим величины расчетной мощности возбудителя для тех случаев работы коллекторного генератора, для которых были ранее приведены характеристики, т. е. для работы генератора при моментах на валу питаемых им двигателей:

$$1) M = \text{const}; 2) M = \frac{k}{f_2}; 3) M = kf_2^2.$$

В первом случае при $M = \text{const}$ было найдено, что E_2 должна быть пропорциональна f_2 , равно как и $\Phi \propto f_2$. При возбуждении с ротора для получения $f_2 = 0$ нужно поле ротора сделать неподвижным в пространстве, т. е. заставить его вращаться в сторону противоположную вращению ротора. Если теперь уменьшить частоту тока возбуждения, то получим один порядок следования фаз, а если увеличить указанную частоту, то порядок следования фаз станет обратным, и двигатели пойдут в обратную сторону по сравнению с первым случаем. Однако условия коммутации (об этом см. далее) заставляют к подобному реверсированию не прибегать, а заменять его простым переключением питающих двигатели проводов.

Таким образом, регулирование частоты f_2 практически производится от нуля до некоторого максимума, зависящего от поставленных требований к синхронной передаче в отношении скорости.

В пределах $0 < f_2 < f_0$ E_R , как было установлено ранее, имеет максимум при $f_2 = \frac{f_0}{2}$, причем по величине — $E_{R\max} = \frac{1}{4} E_{2c}$.

При $f_2 > f_0$ E_R достигает той же величины $\left(\frac{1}{4} E_{2c}\right)$ при $f_2 = 1,21 f_0$.

Если считать, это число периодов наибольшим, при котором должен работать коллекторный генератор, то максимальная величина э. д. с. генератора при этом будет иметь значение: $E_{2\max} = 1,21 E_{2c}$.

Выразим э. д. с. $E_{R\max}$ через $E_{2\max}$:

$$E_{R\max} = \frac{1}{4} E_{2c} = \frac{E_{2\max}}{4 \cdot 1,21} = 0,207 E_{2\max}.$$

Относительная величина реактивной мощности возбуждения определится как отношение максимальных вольтампер возбуждения к максимальным вольтамперам главной цепи.

Это отношение равно

$$\gamma = \frac{m_1 I_{1\max} E_{1\max}}{m_2 I_{2\max} E_{2\max}}.$$

Если на роторе одна обмотка, то $E_R = E_1$; если же имеется отдельная обмотка возбуждения, то надлежит э. д. с. $E_{R\max}$ привести к обмотке возбуждения:

$$E_{1\max} = E_{R\max} = E_{R\max} \frac{w_1 \cdot k_{w1}}{w_R \cdot k_{wR}}.$$

Соответственно нужно было бы привести к обмотке возбуждения и ток I_2 . Чаше же встречается генератор с одной обмоткой на роторе и $m_1 = m_2$, для которого можем написать

$$\gamma = \frac{I_{1\max} E_{R\max}}{I_{2\max} E_{2\max}} = 0,207 \alpha.$$

Очевидно, что такие же результаты мы получили бы и при наличии на роторе отдельной обмотки возбуждения.

Во втором случае (момент на валу обратно пропорционален частоте f_2) значение $E_{R\max} = 0,385 E_{2c}$ (для пределов частоты $f_2 = 0$ и $f_2 = f_0$).

Далее было установлено, что при $f_2 = 1,33 f_0$ э. д. с. E_R достигает значения $0,385 E_{2c}$ (см. § 59).

Соображения относительно реверсирования двигателей остаются в силе и для данного случая.

Если считать, что $f_2 = 1,33 f_0$ является наибольшим рабочим числом периодов коллекторного генератора, то тогда наибольшая э. д. с. E_2 последнего будет равна: $E_{2\max} = \sqrt{1,33} \cdot E_{2c}$, так как при работе двигателя с моментом на валу, обратно пропорциональным числу оборотов, напряжение на его зажимах должно изменяться пропорционально корню квадратному из числа периодов питающего тока.

Далее напишем

$$E_{R\max} = \frac{0,385}{\sqrt{1,33}} E_{2\max} = 0,33 E_{2\max}.$$

Приводя величины вторичной обмотки к обмотке возбуждения, в случае, если на роторе имеется отдельная обмотка возбуждения или $m_1 = m_2$, можем написать:

$$\gamma = 0,33 \frac{I_1}{I_2'} = 0,33 \alpha.$$

Обычно при возбуждении генератора с ротора, на последнем имеется одна обмотка, причем $m_1 = m_2 = 3$. Поэтому можно написать:

$$\gamma = 0,33 \frac{I_1}{I_2} = 0,33 \alpha,$$

где $\alpha = \frac{I_1}{I_2}$ обычно, как и в асинхронных двигателях, равно: $0,2 \div 0,35$.

Очевидно, что если бы мы взяли максимальное число периодов f_2 больше, чем $f_2 = 1,33 f_0$, то соответственно больше была бы и реактивная мощность возбуждения (рис. 66).

Если коллекторный генератор питает синхронные двигатели с моментом на валу, пропорциональным квадрату числа оборотов, то напряжение на его зажимах $U_2 \cong E_2$ должно изменяться прямо пропорционально квадрату числа периодов. Э. д. с. цепи возбуждения равна:

$$E_1' = E_R = -k' (f_0 - f_2) f_2^2.$$

В пределах от $f_2 = 0$ до $f_2 = f_0$ (рис. 67) E_R имеет максимальное значение:

$$E_{R\max} = 0,148 E_{2c}.$$

При $f_2 > f_0$ (направления вращения поля и ротора совпадают) E_R достигает той же величины $0,148 E_{2c}$ при $f_2 = 1,12 f_0$. Будем считать это число периодов, как и в других случаях, приведенных выше, наибольшим. Тогда максимальное напряжение на зажимах генератора $U_2 \cong E_2$, соответствующее числу периодов $f_2 = 1,12 f_0$, будет равно: $E_{2\max} = 1,12^2 E_{2c}$ (рис. 67).

Выразим $E_{R\max}$ через $E_{2\max}$:

$$E_{R\max} = E_1'_{\max} = 0,148 E_{2c} = \frac{0,148}{1,12^2} E_{2\max} = 0,118 E_{2\max}.$$

Отсюда тем же путем, что и в предыдущих случаях, получим:

$$\gamma = 0,118 \frac{I_1}{I_2'} = 0,118 \alpha.$$

Уже отмечалось, что величину α можно принять колеблющейся в пределах $0,2 \leq \alpha \leq 0,35$.

Подставляя эти значения α в выражения для величины γ , получим, что отношение расчетных мощностей возбудителя и коллекторного генератора при возбуждении с ротора для рассмотренных частных случаев будет изменяться в следующих пределах:

- 1) $M = \text{const}$; $\gamma = 0,207\alpha$, что дает $4,15 \div 7,25\%$
- 2) $M = \frac{k}{f_2}$; $\gamma = 0,33\alpha$, „ „ $6,6 \div 11,5\%$
- 3) $M = k f_2^2$; $\gamma = 0,118\alpha$, „ „ $2,35 \div 4,15\%$

Если сопоставить теперь относительную расчетную мощность возбуждения при возбуждении с ротора с подобной же мощностью при возбужде-

нии со статора, то окажется, что последняя мощность значительно больше, а именно: она составляет при $f_{2\max} = f_0 \cdot 20 \div 35\%$.

Следовательно, при возбуждении с ротора возбудитель должен получиться меньше.

Возбуждение со щеток (см. § 53) представляет собой частный случай возбуждения с ротора. Поэтому размеры возбудителя для этого случая будут такие же, какие получаются вообще при возбуждении с ротора.

65. Сопоставление данных обоих типов возбуждения. Практически применимой (по соображениям коммутации), как уже отмечалось, является область регулирования числа периодов от $f_2 = 0$ до $f_2 = f_0$ и несколько более, причем регулирование осуществляется в одну сторону от нуля так, чтобы 1) при возбуждении со статора поле и ротор вращались в одну сторону и 2) при возбуждении с ротора частота на роторе была меньше или равна f_0 . Обозначим отношение частот $\frac{f_2}{f_0}$ через b . Следовательно, если принять указанную выше область регулирования, то величина b будет изменяться в пределах $0 < b < 1$.

Можно выразить через эту величину ряд характерных соотношений в коллекторном генераторе, позволяющих сопоставить оба типа возбуждения при различных рассмотренных выше режимах работы генератора. Основным соотношением является зависимость E_2 от f_2 , т. е. от b (рис. 64, 66 и 67). Далее существенна зависимость от b отношений

$$\frac{E_1'}{E_{2\max}} = \frac{E_S}{E_{2\max}}$$

(возбуждение со статора) и

$$\frac{E_1'}{E_{2\max}} = \frac{E_R}{E_{2\max}}$$

(возбуждение с ротора) и, наконец,

$$\frac{E_1'_{\max}}{E_{2\max}}.$$

Все эти соотношения приведены в табл. VII, причем в ней же даны средние значения величины γ в процентах при $\alpha = 0,25$ от полной мощности генератора.

ТАБЛИЦА VII.

Режим работы генератора	$\frac{E_2}{E_{2\max}}$	$\frac{E_1'}{E_{2\max}} = \frac{E_S}{E_{2\max}}$ возбуждение со статора	$\frac{E_1'}{E_{2\max}} = \frac{E_R}{E_{2\max}}$ возбуждение с ротора	$\frac{E_1'_{\max}}{E_{2\max}}$ возбужд. со статора	$\frac{E_1'_{\max}}{E_{2\max}}$ возбужд. с ротора	γ в %; возбуждение со статора	γ в %; возбуждение с ротора
$M = \frac{k}{f_2}$	$\sqrt{b}$	$b \sqrt{b}$	$\sqrt{b} (1 - b)$	1	0,385	25	9,6
$M = \text{const}$	b	b^2	$b (1 - b)$	1	0,25	25	6,25
$M = k f_2^2$	b^2	b^3	$b^2 (1 - b)$	1	0,148	25	3,7

Следует отметить, что приведенные в таблице значения отношения

$$\frac{E'_{1\max}}{E_{2\max}}$$

при возбуждении с ротора соответствуют максимальному напряжению генератора $U_{2\max} \cong E_{2\max}$, имеющему место при $f_{2\max} = f_0$.

Ранее мы, находя это отношение, брали $f_{2\max}$ несколько большим, например $f_{2\max} \cong 1,12 f_0$ и т. д. Очевидно, что величина $b = \frac{f_2}{f_0}$ устанавливается в каждом частном случае согласно предъявляемым генератору требованиям, причем величины $\frac{E'_{1\max}}{E_{2\max}}$ и γ соответственно изменяются.

66. Система возбуждения с двумя возбудителями. Если мощность коллекторного генератора велика, а вместе с тем желательно иметь весьма легкий ключ, управляющий частотой указанного генератора, то в ка-

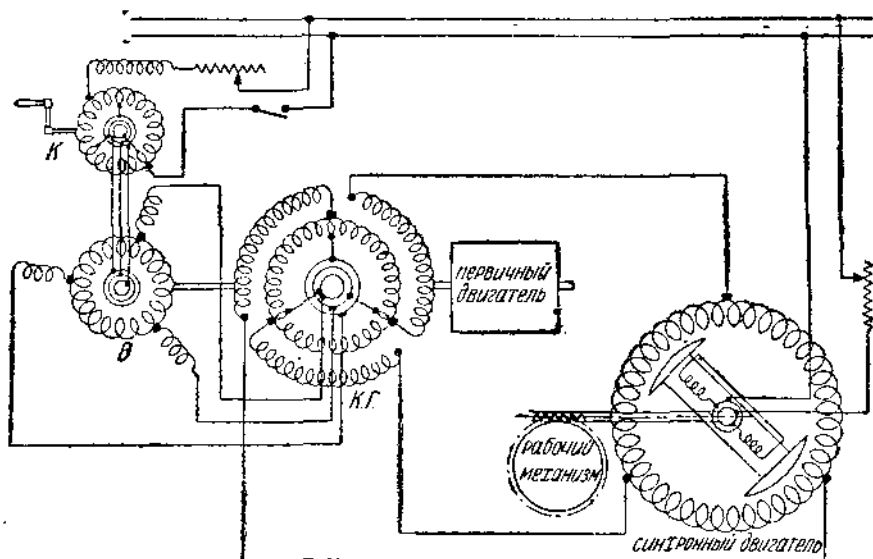


Рис. 71.

честве возбудителя может быть применен коллекторный генератор такого же типа, что и главный, но, конечно, соответственно меньшей мощности. Этот генератор, вращаемый с постоянной скоростью, может быть насажен на вал основного коллекторного генератора. Для возбуждения меньшего генератора-возбудителя служит какой-либо из ключей-коллекторов, мощность которого будет составлять всего несколько процентов от мощности генератора-возбудителя, в свою очередь составляющей несколько процентов от мощности главного генератора.

Положим, что мы возбуждаем главный генератор К. Г. (рис. 71) с ротора при помощи коллекторного генератора-возбудителя В, возбуждаемого ключом-возбудителем К также с ротора. В схеме коллекторного генератора, изображенной на рис. 71, в качестве ключа-возбудителя К применен вра-

щающийся коллекторный преобразователь постоянного тока в трехфазный переменный ток.

Промежуточный возбудитель B позволяет весьма сильно уменьшить мощность ключа-возбудителя K . Так, например, если положить, что $\frac{I_1'}{I_2} = \alpha = 0,25$, то величина γ' в процентах, представляющая собой отношение расчетной мощности ключа-возбудителя K к расчетной мощности генератора $K. Г.$ будет равна для различных режимов работы последнего (возбуждение принято с ротора):

- 1) $M = \frac{k}{f_2} \quad \gamma' = 1,07\%$
- 2) $M = k \text{ const} \quad \gamma' = 0,92\%$
- 3) $M = k f_2^2 \quad \gamma' = 0,66\%$

Следовательно, синхронной передачей с коллекторным генератором в 100 kVA и синхронными двигателями на эту же суммарную мощность можно управлять, в зависимости от режима работы двигателей, ключами-возбудителями теоретически со следующими мощностями (здесь не учтены падение напряжения в возбудителе и потери в нем): для первого режима 1,07 kVA, для второго режима 0,92 kVA и для третьего 0,66 kVA.

Если число пар полюсов возбудителя B (рис. 71), так же как и число его оборотов, равны числу пар полюсов и числу оборотов главного коллекторного генератора, то при соответствующем включении частота коллекторного генератора будет в точности равна частоте ключа-возбудителя K . Так, если поле и ротор возбудителя B вращаются в одну сторону, то на его статоре будет иметь место частота $f_{s1} = f_k + f_0$, где f_k — частота возбудителя K , а f_0 — механическая частота вращения машин B и $K. Г.$ Указания частота f_{s1} подается на ротор генератора $K. Г.$, причем, если порядок следования фаз взят обратный, т. е. поле вращается против вращения ротора, то будем иметь на статоре генератора:

$$f_2 = f_{s2} = f_{s1} - f_0 = f_k + f_0 - f_0 = f_k,$$

т. е. частота коллекторного генератора равна частоте ключа-возбудителя.

При неподвижном ключе K в ротор возбудителя B поступает постоянный ток, точнее многофазный переменный ток частоты $f_k = 0$. Возбудитель B при этом будет работать как синхронный генератор, частота тока которого на статоре равна f_0 . В ротор генератора $K. Г.$ поступает ток возбуждения частоты f_0 . Порядок следования фаз таков, что поле вращается в сторону, противоположную вращению ротора, причем скорости поля и ротора одинаковы $\left(n_0 = \frac{60 f_0}{p}\right)$, благодаря чему поле ротора оказывается неподвижным в пространстве и со щеток поступает постоянный ток (аналогия с одноякорным преобразователем по линии преобразования частоты, а не с энергетической стороны, так как в данном случае мы имеем дело с генератором благодаря компенсационной обмотке, препятствующей поступлению на кольца генератора мощности, как в одноякорном преобразователе). Следовательно, здесь получаются те же соотношения, что и при возбуждении со статора.

Если порядок следования фаз в роторе генератора $K. Г.$ изменить, чтобы поле и ротор вращались в одну сторону, то при неподвижном ключе K в рабочей цепи коллекторного генератора мы получим частоту

$f_2 = 2f_0$.¹ Если желательно иметь передачу синхронного движения от ключа-возбудителя к синхронному двигателю и вместе с тем избежать зубчатой передачи между двигателем и рабочим механизмом или упростить ее, то можно применить двигатель на другое число полюсов, чем ключ-возбудитель. Тогда между последним и управляемыми двигателями будет иметь место синхронность в общем смысле этого слова, когда угловое перемещение ключа строго соответствует количественно другому, но вполне определенному перемещению управляемого двигателя. В этом случае в синхронную передачу оказывается как бы вставленной зубчатая передача, дающая определенное соотношение оборотов между ключом и двигателем.

IV. ОБМОТКИ И КОММУТАЦИЯ КОЛЛЕКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА.

67. Коммутация коллекторных машин переменного тока. Как известно, коллекторные машины переменного тока имеют значительно худшие условия коммутации, чем коллекторные машины постоянного тока. Это объясняется тем, что кроме реактивной э. д. с. (э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции), которая имеет место в короткозамкнутых витках машины постоянного тока от переключения секции из одной ветви в другую, в короткозамкнутых витках машины переменного тока индуктируются еще э. д. с. от пульсирующего или вращающегося потока машины (трансформаторная э. д. с. или э. д. с. вращения). Реактивная э. д. с. компенсируется дополнительными полюсами с обмоткой, последовательно включенной в главную цепь коллекторной машины. Для компенсации же указанных добавочных э. д. с. должны быть применены на дополнительных полюсах отдельные обмотки.

Принцип работы последовательных добавочных полюсов в однофазной коллекторной машине ничем не отличается от принципа работы добавочных полюсов машины постоянного тока с коллекторной обмоткой, так как изменение тока во времени в однофазной машине соответствует изменению тока в машине постоянного тока при быстром изменении режима работы.

Трехфазную машину можно рассматривать как совмещение трех однофазных машин. Поэтому по существу нет никаких отличий и в работе последовательных добавочных полюсов в трехфазной машине, в которой имеет место простое совмещение на протяжении двойного полюсного деления обмоток добавочных полюсов трех- и однофазных машин, обтекаемых токами, сдвинутыми во времени на 120° .

Трансформаторная э. д. с. и э. д. с. вращения не зависят, как реактивная э. д. с., от нагрузки в главной цепи (от силы тока), а определяются величиной потока машины, частотой тока возбуждения и скоростью вращения ротора. Компенсировать указанные э. д. с. можно при помощи шунтовых добавочных полюсов, создающих некоторое неизменное коммутирующее поле вне зависимости от скорости вращения ротора.

Вот это обстоятельство и вызывает затруднения в отношении коммутации коллекторных двигателей, так как они имеют изменяющуюся от нуля (период пуска) до некоторого максимума скорость. Наиболее тяжелые условия коммутации получаются при пуске.

¹ Здесь можно провести аналогию с генератором повышенной частоты Бетево, описанном, например, в книге Фреймана — Радиотехника.

Благодаря этому приходится допускать весьма малое значение напряжения между крайними щеток, что обуславливает необходимость делать коллектор значительно больших размеров, чем у машин постоянного тока на ту же мощность и обороты.

Рассматриваемый коллекторный генератор переменного тока переменной частоты находится в значительно более благоприятных условиях в отношении коммутации, чем коллекторные двигатели переменного тока.

Это различие объясняется тем, что при постоянной скорости вращения и неподвижных щетках можно с большим успехом компенсировать э. д. с. короткозамкнутых витков, созданные воздействием поля машины, при помощи шунтовых добавочных полюсов, чем в коллекторной машине, работающей при переменной скорости. Поэтому многофазная коллекторная машина постоянного числа оборотов может быть построена на значительно большую мощность и напряжение, чем указанный коллекторный двигатель.

Коллектор этой машины постоянного числа оборотов может иметь такие же размеры, в случае применения шунтовых и последовательных добавочных полюсов, что и коллектор машины постоянного тока.

68. Электродвижущие силы короткозамкнутых секций. Предположим первоначально, что ротор коллекторного генератора с возбуждением со статора неподвижен. Круговое вращающееся поле статора будет индуцировать в обмотке ротора в этом случае, как известно, э. д. с.

$$E_R = 4,44 \omega_R k_{wR} (\pm f) \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Знаки $\pm$ перед величиной соответствуют условно выбранным двум возможным направлениям вращения поля (например, если знак плюс соответствует вращению по часовой стрелке, то знак минус против часовой стрелки, и наоборот).

В частности, вращающимся полем будет индуцироваться э. д. с. в секциях, оказавшихся замкнутыми накоротко щетками при некотором случайном положении неподвижного ротора. Эти э. д. с. можно назвать, так же как и э. д. с. E_R при неподвижном роторе, трансформаторными э. д. с., поскольку коллекторная машина работает при неподвижном роторе как трансформатор с вращающимся полем (аналогично трехфазному индукционному регулятору).

Трансформаторная э. д. с. в короткозамкнутой секции равна:

$$e_T = 4,44 \omega_k (\pm f_1) \Phi \cdot 10^{-8}, \quad (32)$$

где ω_k — число витков в секции; коэффициент обмотки равен единице, поскольку все витки секции лежат в одном пазу. Э. д. с. создает в короткозамкнутой секции ток короткого замыкания, замыкающийся через щетку и находящиеся под ней коллекторные пластины.

Теперь представим себе, что мы вращаем короткозамкнутую секцию в неподвижном магнитном поле. Тогда в этой секции будет индуцироваться некоторая э. д. с. от вращения секции в магнитном поле (э. д. с. вращения). Величина ее должна быть равна

$$e_B = 4,44 \omega_k f_0 \Phi \cdot 10^{-8}, \quad (33)$$

где f_0 — механическая частота, соответствующая вращению ротора.

Если число оборотов поля и число оборотов ротора одинаковы и направлены в одну сторону, то очевидно, что э. д. с. e_T и e_B будут равны

и направлены противоположно. Это можно заключить из того, что в одном случае вращается поле, а проводники неподвижны, а в другом случае вращаются проводники якоря в ту же сторону, следовательно, они пересекают поле в обратном направлении. Э. д. с. короткозамкнутой секции от действия потока возбуждения можно представить как сумму или разность двух э. д. с. e_T и e_B , накладывая картину с неподвижным ротором и вращающимся полем на картину с вращающимся ротором и неподвижным полем. Очевидно, что результирующая э. д. с. e короткозамкнутой секции, созданная воздействием поля машины, будет пропорциональна э. д. с. ротора E_R .

Таким образом, будем иметь:

$$e = e_T - e_B = 4,44 \omega_k (\pm f_1 - f_0) \Phi \cdot 10^{-8} = k E'_R. \quad (34)$$

Знак плюс соответствует совпадению направления вращения поля и ротора.

При $f_1 = f_0$ э. д. с. $e = 0$. Действительно, в этом случае $E_R = 0$, так как поле статора и ротор будут вращаться синхронно и линии поля не будут пересекать проводников ротора. Можно расценить этот момент работы коллекторного генератора на две картины, указанные выше, причем получим две э. д. с. e_T и e_B , равные и противоположно направленные, сумма которых дает нуль.

Если ротор и поле вращаются в разные стороны, то э. д. с. e_T и e_B будут складываться, так как

$$e = e_T - e_B = 4,44 \omega_k (-f_1 - f_0) \Phi \cdot 10^{-8}. \quad (35)$$

По абсолютной величине e э. д. с. окажется равной $e = e_T + e_B$.

В частности при $f_1 = -f_0$ (поле и ротор вращаются в разные стороны)

$$e = 2 \cdot 4,44 \omega_k f_0 \Phi \cdot 10^{-8}. \quad (36)$$

При рассмотрении э. д. с. короткозамкнутой секции важна абсолютная величина указанной э. д. с. e (знак не играет роли).

Поэтому, приняв во внимание, что при согласном вращении поля и ротора, в случае

$$0 < f_1 < f_0 \quad e_B > e_T,$$

а в случае

$$f_1 > f_0 \quad e_T > e_B$$

можем написать:

$$\begin{array}{ll} \text{при } 0 < f_1 < f_0 & e = e_B - e_T \\ \text{„ } f_1 < 0 & e = e_B + e_T \\ \text{„ } f_1 > f_0 & e = e_T - e_B \end{array}$$

Следовательно, для компенсации результирующей э. д. с. e в короткозамкнутой секции необходимо создавать при различных отношениях f_1 и f_0 различную по величине коммутирующую э. д. с. e_k .

При числах периодов, отличающихся от синхронного f_0 и при $f_1 > 0$ нужно компенсировать шунтовыми добавочными полюсами только разницу $e_B - e_T$ или $e_T - e_B$. Наоборот, при $f_1 < 0$ должно рассчитывать добавочные полюса на сумму $e_B + e_T$.

Таким образом, надлежит подчеркнуть, что коллекторный генератор с круговым вращающимся полем имеет весьма различные условия коммутации при вращении поля в направлении вращения ротора и против него. Это обстоятельство является весьма существенным недостатком коллекторного генератора с неявновыраженными полюсами, так как оно препятствует реверсированию двигателей путем простого изменения направления вращения ключа возбуждения. (Практически в случае возбуждения со статора возможна работа лишь при согласном вращении поля и ротора; при возбуждении с ротора реверсирование управляемых двигателей без переключения в главной цепи также затруднительно).

Реверсирование при питании синхронных двигателей от генератора с неявновыраженными полюсами приходится осуществлять путем переключения проводников в главной линии, питающей двигателя, что далеко не всегда является удобным. Указанного недостатка лишен коллекторный генератор с явновыраженными полюсами (генератор Шербиуса). Однако этот последний не допускает больших частот в главной цепи, так как иначе шунтовые добавочные полюса получаются громоздкими. Генератор же с неявновыраженными полюсами при возбуждении со статора может иметь в главной цепи нормальную частоту (50 периодов) и более, так как коммутация вблизи синхронного числа оборотов, как указывалось выше, получается весьма благоприятной (при согласном, конечно, вращении поля и ротора). В частности же при $f_1 = f_0$ ($e = 0$) имеют место условия коммутации, подобные условиям коммутации в машинах постоянного тока, при которых в короткозамкнутой секции индуктируется лишь реактивная э. д. с., компенсируемая при помощи последовательных добавочных полюсов. Кроме того, коллекторный генератор, работая около числа периодов $f_1 = f_0$, может допускать довольно широкую регулировку частоты. Так, при режиме работы генератора, отвечающем работе синхронных двигателей с постоянным моментом на валу, величина э. д. с.

$$E_R = k (f_0 - f_2) f_2$$

при

$$0 < f_2 < f_0$$

имеет максимум при

$$f_2 = \frac{f_0}{2};$$

в этот же момент имеет максимум и результирующая э. д. с. e короткозамкнутой секции.

Ранее было установлено, что в этом случае

$$E_{R\max} = \frac{1}{4} E_{zc}.$$

Соответственно этому можем написать

$$e_{\max} = \frac{1}{4} e_{Bc},$$

где e_{Bc} — э. д. с. вращения короткозамкнутой секции, имеющая место при потоке, соответствующем синхронному числу оборотов. При питании двигателя с моментом на валу, пропорциональным квадрату числа оборотов,

$$e_{\max} = \frac{4}{27} e_{Bc}.$$

Для компенсации приведенных величин шунтовые добавочные полюса должны создать в обоих случаях в короткозамкнутой секции коммутационные э. д. с. e_k , противоположно направленные и равные указанным значениям $e_{\max}$.

При возбуждении с ротора магнитный поток Φ будет перемещаться относительно обмотки ротора со скоростью, соответствующей частоте возбуждения f_1 . Как известно, при согласном вращении поля и ротора частота в рабочей цепи генератора $f_2 = f_0 + f_1$. При противоположном их вращении $f_2 = f_0 - f_1$. При частоте $f_2 = f_0$ (в этот момент $f_1 = 0$) условия коммутации получаются наиболее благоприятными, так как соответствуют коммутации машин постоянного тока. При $f_2 = 0$ (постоянный ток — двигатели стоят) и $f_1 = f_0$ условия коммутации получаются довольно благоприятными, так как хотя поток пересекает короткозамкнутую секцию со скоростью, соответствующей частоте f_0 , однако сам поток при большинстве

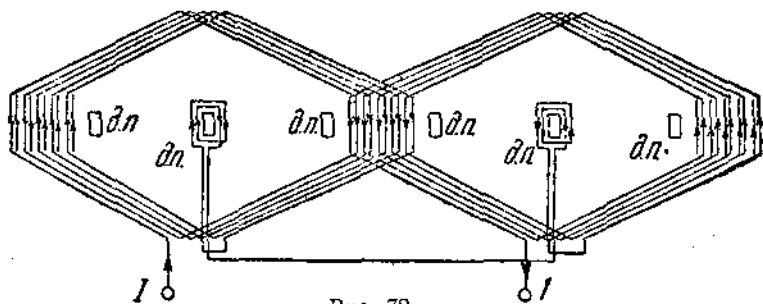


Рис. 72.

режимов оказывается небольшим по величине. Если же режим работы генератора таков, что $\Phi = \text{const}$ ($E_2 = \text{const}$), то условия коммутации получаются менее благоприятными. При $f_1 > f_0$ и вращении поля и ротора в разные стороны поток пересекает обмотку статора в обратном предыдущему направлении, меняя на зажимах генератора порядок следования фаз (двигатели меняют направление вращения). Условия коммутации получаются вовсе не благоприятными, так как скорость пересечения потока короткозамкнутых секций велика ($f_1 > f_0$) и кроме того поток с увеличением f_2 растет по величине. Благодаря этому реверсирование двигателей таким способом является практически трудно осуществимым.

69. Главные обмотки коллекторного генератора с неявновыраженными полюсами. Обмотка ротора генератора обычно представляет собой замкнутую петлевою обмотку постоянного тока с диаметральной шаг, соединенную с коллектором, и с кольцами в случае возбуждения с ротора. Компенсирующая обмотка выполняется по типу разрезанных обмоток постоянного тока с высоким коэффициентом обмотки $k_{\omega} = 0,956$ и диаметральной шаг. Указанная обмотка последовательно соединяется с обмоткой последовательных добавочных полюсов, число которых на двойное полюсное деление берется шесть. Схема одной фазы компенсирующей обмотки с обмоткой последовательных добавочных полюсов изображена на рис. 72. На каждую фазу приходится два добавочных полюса д. п., расположенных на расстоянии друг от друга в 60 электрических градус.

В машинах малой мощности компенсирующая обмотка может выполняться без последовательных полюсов. Для уничтожения реакции якоря компенсирующая обмотка должна являться зеркальным изображением обмотки ротора. Следует отметить, что благодаря небольшому числу фаз м. д. с. ротора не распределяется синусоидально вдоль воздушного зазора. Форма указанной м. д. с. изменяется через определенные промежутки времени (см. подобное изменение на рис. 74) и поэтому имеют место высшие гармонические. Очевидно, что для полной компенсации реакции якоря нужно, чтобы подобную форму имела и м. д. с. компенсирующей обмотки, что возможно при совершенно идентичном выполнении ее с обмоткой ротора и соединении ее так же, как и последняя, в многоугольник, например треугольник. Схема генератора с компенсационной обмоткой, соединен-

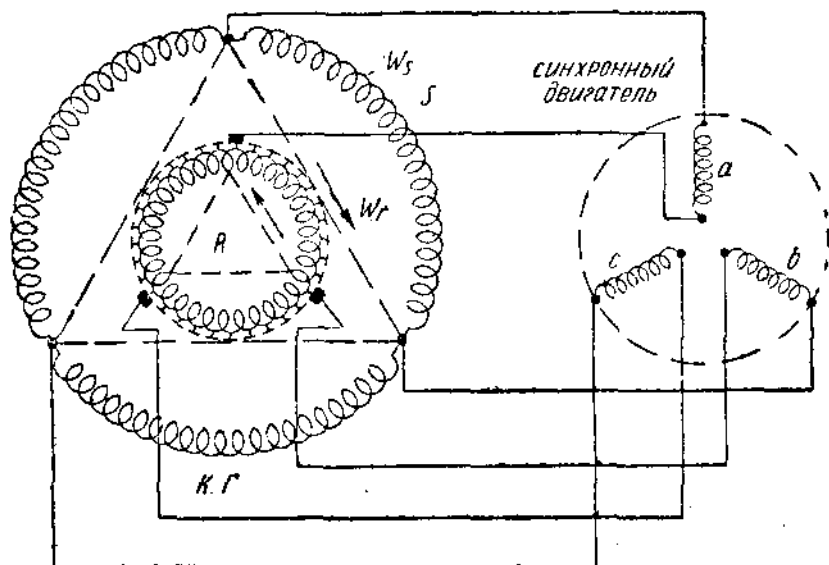


Рис. 73.

ной в многоугольник, изображена на рис. 73. Подобная схема дает полную компенсацию реакции якоря, но вместе с тем является весьма неудобной, так как требует числа соединительных проводов между генератором и двигателем вдвое большего, чем число фаз.

Поэтому обычно выполняют для обмотки статора соединение в звезду, которое является более удобным по числу соединительных проводников, но в этом случае при одинаковости выполнения компенсирующей обмотки и обмотки якоря первая дает полную компенсацию только для основной волны м. д. с. якоря, высшие же гармоники остаются непогашенными, что способствует ухудшению коммутации коллекторного генератора. Указанная разница формы м. д. с. одинаково выполненных обмоток, но имеющих различное соединение (треугольник и звезда), для одного и того же момента времени обуславливается тем обстоятельством, что токи в противолежащих слоях обмоток, благодаря разному роду соединений последних, оказываются сдвинутыми во времени не на требующиеся 180° , а на 150° . (Разница в 30° определяется тем, что линейные напряжения при звезде и треугольнике сдвинуты

на 30°). Наибольшая разница м. д. с. статора и ротора получается для моментов времени, когда в роторе ток в одной из фаз достигает своего максимального значения, а в статоре в одной из фаз равен нулю (сдвинут относительно тока ротора на 30°), или наоборот.

Для полной компенсации реакции якоря компенсирующая обмотка при соединении в звезду должна быть выполнена не одинаково с роторной обмоткой. Так, можно устроить каждую фазу компенсирующей обмотки вы-

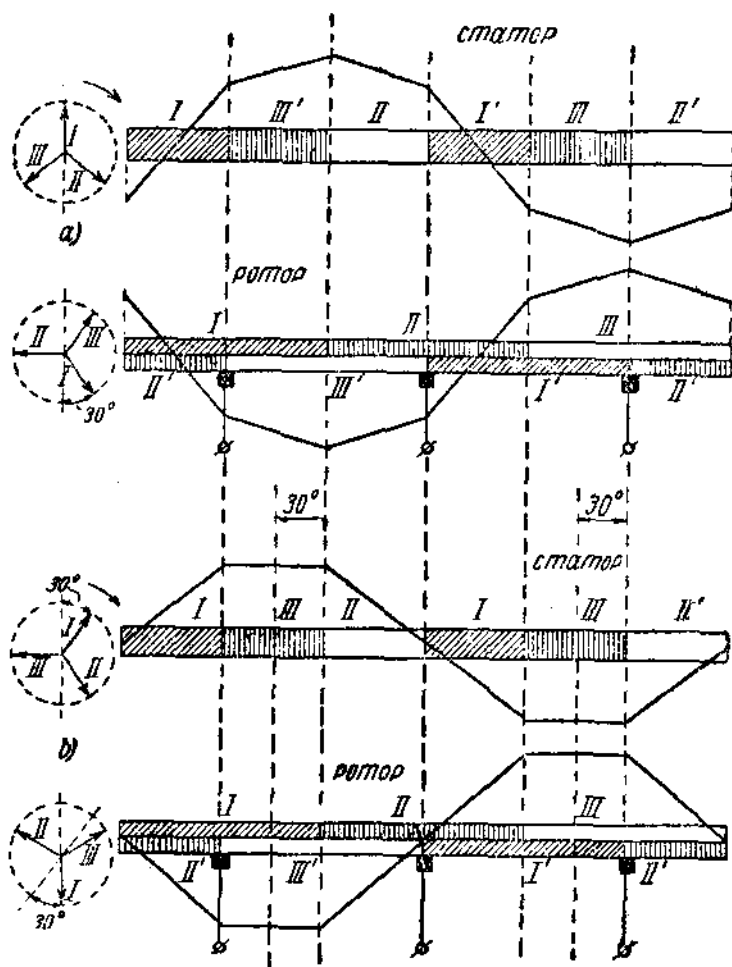


Рис. 74.

полненной из двух ветвей, каждая из которых идентична роторной обмотке, соединенных последовательно и сдвинутых в пространстве на угол в 60° , чему соответствует сдвиг результирующей м. д. с. во времени на 30° .¹

¹ См. статью проф. М. П. Костенко — «Сборник ЛЭМИ», № 2 (IV), 1934 г. — Коллекторный компенсированный альтернатор с неявно- и явнополюсной системой возбуждения переменного тока.

На рис. 74, *a* и *b* изображено расположение кривых м. д. с. статора и ротора для двух моментов времени, отличающихся на 30° .

Подбор витков обмоток ротора и статора таков, что имеет место: полная компенсация реакции якоря, так как м. д. с. последнего и статора являются зеркальным изображением друг друга.

В случае возбуждения со статора на последнем еще располагается обмотка возбуждения, представляющая собой обычную обмотку многофазного тока, создающую вращающееся магнитное поле, которое при равномерном воздушном зазоре является равномерным круговым вращающимся полем. Иногда же в зоне коммутации берется увеличенный зазор, дающий в ней ослабленную индукцию, что сказывается на величине э. д. с. e_B вращения, которая соответственным образом уменьшается. Так, например, если выполнить воздушный зазор в коммутационной зоне увеличенным в два раза, то э. д. с. e_B уменьшится также в два раза.

Благодаря этому результирующая э. д. с. $e = e_B - e_T$ будет равна нулю не при скорости поля, синхронной со скоростью вращения ротора ($f_1 = f_0$), а при половине синхронной скорости: ($f_1 = 0,5f_0$).

Кроме того, максимальное значение результирующей э. д. с. e в зоне от $f_1 = 0$ до величины f_1 , при которой $e = 0$, сильно уменьшается. Это позволяет при работе в некотором диапазоне частот в пределах $f_1 = 0$ до $f_1 \cong 0,3 \div 0,5f_0$ обходиться вовсе без шунтовых добавочных полюсов, потому что э. д. с. e получается в указанных условиях при увеличенном воздушном зазоре весьма небольшой. Это обстоятельство в применении к последовательным трехфазным коллекторным двигателям было указано Гейландом,¹ а в применении к коллекторному генератору — проф. М. П. Костенко.²

Непосредственно для синхронной передачи указанный диапазон частот является недостаточным, так как дает малую скорость для управляемых двигателей. Кроме того, тогда оказывается выгоднее применить генератор Шербиуса, который как раз и строится на небольшие частоты и позволяет осуществить реверсирование двигателей реверсированием ключа-возбудителя. Генератор с неявновыраженными полюсами и пределами изменения частоты возбуждения от $f_1 = 0$ до $f_1 = 0,3 \div 0,5f_0$ может быть применен в каскадных установках с однозонной регулировкой скорости (об этом см. далее).

70. Обмотки добавочных полюсов. Уже отмечалось, что для получения безыскровой коммутации в коллекторном генераторе применяются для компенсации в короткозамкнуемой секции реактивной э. д. с. последовательная обмотка добавочных полюсов, а для компенсации э. д. с. трансформаторной и вращения — шунтовая обмотка. Последовательная обмотка должна создать коммутирующее поле, величина которого пропорциональна току нагрузки. Это поле и поле, создаваемое компенсационной обмоткой, должны иметь одно и то же направление. Добавочные полюса располагаются на оси катушки каждой из фаз компенсационной обмотки. Кривая м. д. с., создаваемой одной фазой компенсационной обмотки и последовательной обмоткой добавочных полюсов, изображена на рис. 75. Здесь w_s — витки компенсирующей обмотки, а w_g — витки последовательной обмотки добавочных полюсов.

¹ Е. и. М., 1933 г., Н. 14—15, S. 173.

² Сборник ЛЭМИ, № 2 (IV).

Подобная картина распределения м. д. с., создаваемой указанными двумя последовательно соединенными обмотками одной фазы, будет иметь место для каждой из фаз. На рис. 76, *a* и *b* представлена кривая м. д. с., создаваемой всеми тремя фазами компенсирующей обмотки и тремя фазными последовательными обмотками добавочных полюсов. Кривая дана для двух основных моментов распределения трехфазного тока, отличающихся друг от друга на 30° . Подобное распределение м. д. с., но без последовательных обмоток добавочных полюсов представлено на рис. 74.

Как видно из рис. 76, коммутрующие поля расположены в местах раздела между зоной одной фазы и зоной другой фазы. При перемещении м. д. с. по окружности статора коммутрующие поля должны оставаться на одном месте, так как коммутация осуществляется неподвижными щетками.

Амплитуда пульсирующего на одном месте коммутующего поля пропорциональна мгновенному значению рабочего тока генератора. Расчет

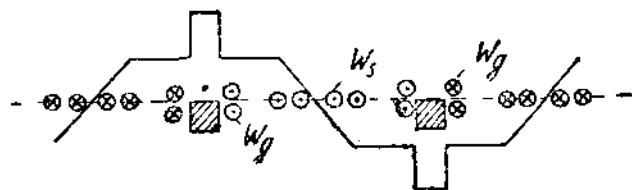


Рис. 75.

последовательных добавочных полюсов в коллекторном генераторе существенно не отличается от расчета подобных полюсов в машинах постоянного тока и однофазных коллекторных машинах переменного тока.

Реактивная э. д. с. в короткозамкнутой секции при прямолинейной коммутации (коммутируется один верхний или нижний проводник) может быть подсчитана по формуле, приводимой Арнольдом: ¹

$$e_s = 2w_k \cdot AS\lambda_s \cdot l \cdot v \cdot \frac{t_{zR}}{t_{zR} + b_D - \beta_D} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot 10^{-8} \text{ V}, \quad (37)$$

где w_k — число витков в секции; AS — линейная нагрузка; λ_s — эквивалентная проводимость (с учетом лобовых частей) для потоков рассеяния вокруг активных сторон проводников секции; l — длина якоря; v — окружная скорость; t_{zR} — шаг по зубцам ротора; b_D и β_D — соответственно ширина щетки и ширина изоляции между коллекторными пластинами, приведенные к диаметру ротора. Множитель $\sin \frac{\pi}{m}$ (m — число фаз машины) учитывает то, что в многофазной машине ток при переключении из одной фазы в другую изменяет свою величину только до величины тока соседней фазы, в то время как в машинах постоянного тока и однофазных ток изменяет свой знак на обратный. Коммутирующая э. д. с. e_k' , создаваемая полем последовательных добавочных полюсов при пересечении его сторонами короткозамкнутой секции, равна

$$e_k' = 2w_k \cdot \frac{B_g'}{\sqrt{2}} \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ V}. \quad (38)$$

¹ Arnold. Bd. 2, S. 163—176.

При условии прямолинейной коммутации $e_s = e_k'$, откуда величина индукции поля последовательных добавочных полюсов равна:

$$B_g' = \sqrt{2} AS \lambda_s \sin \frac{\pi}{m} \frac{t_{zR}}{t_{zR} + b_D - \beta_D}. \quad (39)$$

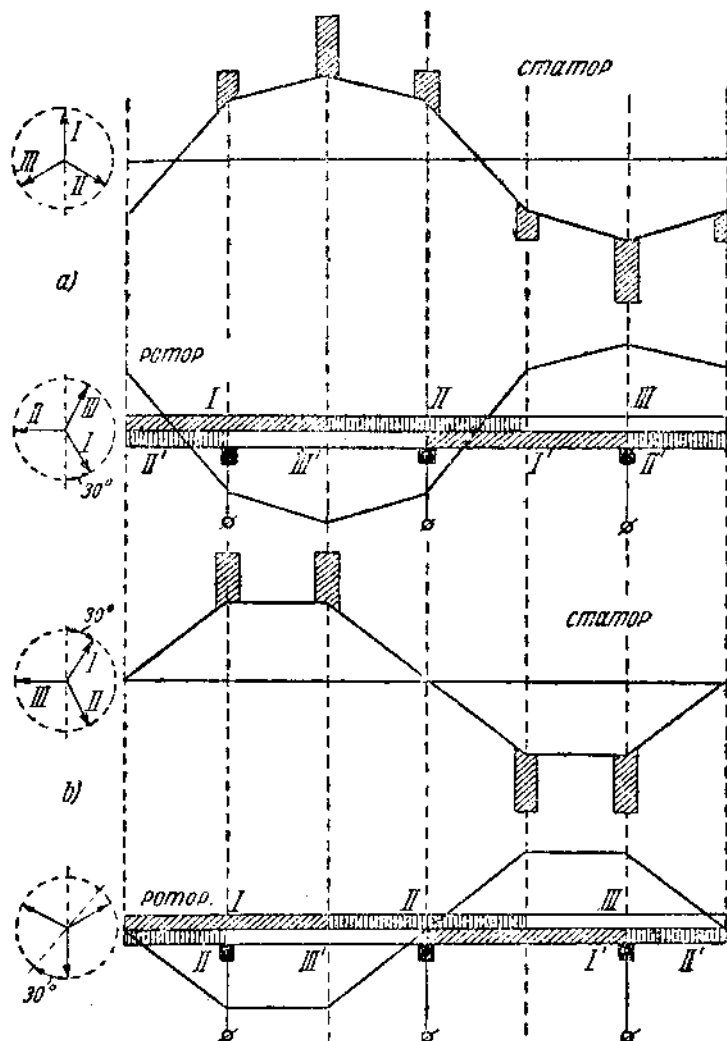


Рис. 76.

В случае трехфазной машины ($m=3$) имеем

$$B_g' = \sqrt{\frac{3}{2}} AS \lambda_s \cdot \frac{t_{zR}}{t_{zR} + b_D - \beta_D}. \quad (40)$$

Ампервитки на один полюс для проведения потока добавочных полюсов через воздушный зазор и железо равны:

$$AW_g' = 0,8 B_g' \delta_g \cdot k. \quad (41)$$

Коэффициент k учитывает сопротивление магнитному потоку при прохождении его по железу.

Шунтовая обмотка добавочных полюсов располагается также в коммутационной зоне на том же сердечнике, что и последовательная обмотка.

Электродвижущая сила e , наводимая в короткозамкнутой секции вращающимся магнитным потоком, в машинах с равномерным воздушным зазором и возбуждением со статора равна:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } 0 < f_1 < f_0 \quad e &= e_B - e_T = 4,44 \, w_k (f_0 - f_1) \Phi \cdot 10^{-8}; \\ \text{при } f_1 > f_0 \quad e &= e_T - e_B = 4,44 \, w_k (f_1 - f_0) \Phi \cdot 10^{-8}. \end{aligned} \right\} (34)$$

Следовательно, при изменении частоты э. д. с. e не остается постоянной, а меняется. Поэтому для расчета шунтовых добавочных полюсов нужно останавливаться на некотором среднем значении, определенном на основании заданного диапазона частот и режима работы генератора (зависимость момента двигателей от числа их оборотов). Установленное значение э. д. с. e должно компенсироваться равной ей и противоположно направленной коммутирующей э. д. с. e_k'' , создаваемой потоком шунтовой обмотки добавочного полюса

$$e_k'' = 2w_k \frac{B_g''}{\sqrt{2}} \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8}. \quad (42)$$

Из равенства э. д. с. $e = e_k''$ может быть определена индукция под добавочным полюсом от шунтовой обмотки:

$$B_g'' = \frac{\pi (f_0 - f_1) \Phi}{l \cdot v} \quad \text{или} \quad B_g'' = \frac{\pi (f_1 - f_0) \Phi}{l \cdot v}. \quad (43)$$

Если в коммутирующих зонах под добавочными полюсами воздушный зазор увеличен в k раз, то э. д. с. e от вращающегося потока равна:

$$e = 4,44 \, w_k \left(f_1 - \frac{f_0}{k} \right) \Phi \cdot 10^{-8} \text{ В}. \quad (44)$$

В таком случае индукция под добавочным полюсом должна иметь значение:

$$B_g'' = \frac{\pi \left(f_1 - \frac{f_0}{k} \right) \Phi}{l \cdot v}. \quad (45)$$

Как уже отмечалось, подбором для данного конкретного диапазона частот величины k в некоторых случаях необходимость в машине с неявно-выраженными полюсами шунтовой обмотки добавочных полюсов может быть устранена.

После нахождения значений индукций B_g' и B_g'' , которые должны быть отдельно созданы двумя обмотками (шунтовой и последовательной) добавочных полюсов, расчет последних ведется обычным образом.

КОЛЛЕКТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ЯВНОВЫРАЖЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ.

71. Общие данные. Коллекторный генератор Шербиуса переменной частоты и постоянного числа оборотов имеет на статоре явно выраженные полюса, на которые наложена обмотка возбуждения. Таким образом, с точки зрения возбуждения указанный генератор является коллекторным генератором с возбуждением со статора. Включение его в схему синхронной связи точно такое же, как и генератора с неявно выраженными полюсами Костенко — Япольского. Очевидно, что частота во вторичной цепи (рабочей цепи) генератора равна частоте возбуждения. Процесс управления синхронными двигателями в схеме с генератором Шербиуса протекает

так же, как и при генераторе Костенко — Япольского, т. е. при помощи ключа-возбудителя, расчетная мощность которого составляет лишь некоторую часть от расчетной мощности генератора (расход энергии на возбуждение по отношению к рабочей мощности машины почти такой же, как и у асинхронных машин).

Так же, как и в генераторе Костенко — Япольского, величина и фаза вторичного напряжения всецело определяются, при неизменном числе оборотов, полем возбуждения.

Экономически машина Шербиуса допускает работу на небольших частотах, не превосходящих $20 \div 22$ Hz, а обычно $15 \div 18$ Hz, что является довольно существенным недостатком, по сравнению с генератором Ко-

стенко — Япольского, при требуемых скоростях движения в большинстве современных установок. С другой стороны, рассматриваемый генератор имеет то преимущество, что допускает реверсирование управляемых двигателей, без каких-либо переключений в главной цепи, путем лишь изменения порядка следования фаз в цепи возбуждения (изменение направления вращения ключа-возбудителя).

В отличие от коллекторного генератора с неявно выраженными полюсами Костенко — Япольского обмотка возбуждения W_1 (рис. 77) генератора Шербиуса расположена на трех явно выраженных неподвижных полюсах I, II, III, находящихся друг относительно друга под углом в 120° пространственных градусов.

Каждый из полюсов возбуждается током одной фазы, так что в целом система имеет три пульсирующих потока, сдвинутых во времени и пространстве на 120 электрических градусов. В этом заключается коренное отличие генератора Шербиуса от генератора Костенко — Япольского, который имеет круговое вращающееся поле, в то время как первый — три пульсирующих поля. В отношении коммутации, как будет изложено далее,

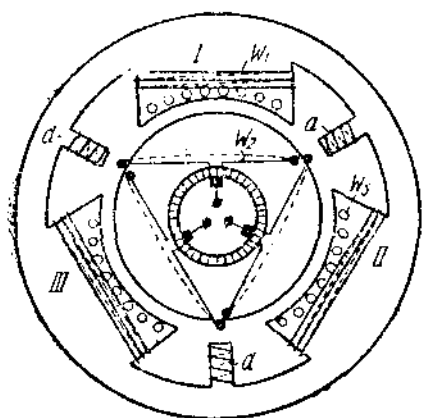


Рис. 77.

такая разница имеет существенное значение. Ротор имеет обмотку W_R по типу обмоток постоянного тока. Шаг обмотки W_R при трех полюсах укорочен до $2/3\pi$, так как полюсное деление в машине Шербиуса составляет $2/3\pi$. При таком укороченном шаге в момент коммутации обе стороны секции будут располагаться в коммутационной зоне между полюсами (рис. 77).

Расположенные на коллекторе три щетки соединяются, так же как и в генераторе Костенко — Япольского, с компенсирующей обмоткой W_S на статоре, размещенной равномерно по окружности статора как в полюсных наконечниках основных полюсов, так и в пространстве между ними. Между главными полюсами I, II, III в коммутационных зонах помещаются три добавочных полюса d , снабженных двумя обмотками возбуждения: шунтовой и последовательной, соединенной с компенсирующей обмоткой. Наличие добавочных полюсов при постоянстве вращения генератора дает весьма хорошую коммутацию. Коллекторный генератор может быть выполнен с шестью явно выраженными полюсами на потенциальную волну (на двойное полюсное деление. См. рис. 78). В этом случае компенсационная обмотка W_S по типу яв-

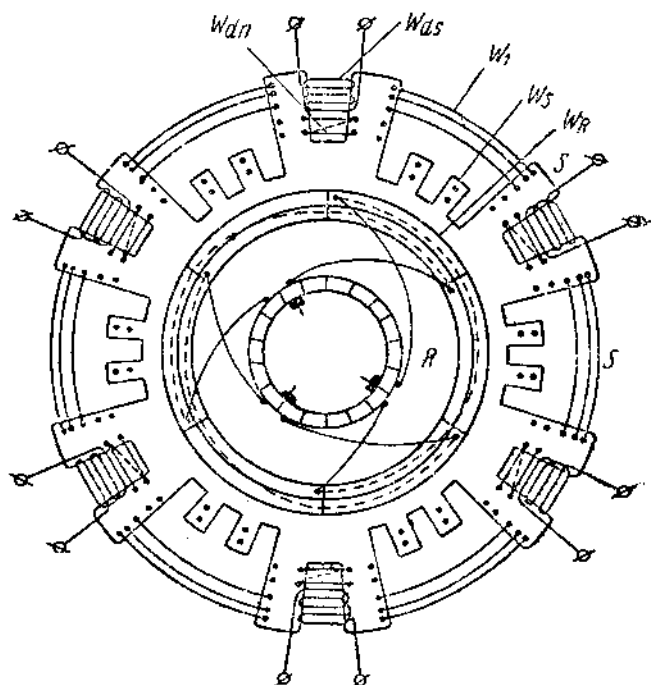


Рис. 78.

ляется разрезанной обмоткой постоянного тока с диаметральной шаг. Обмотка же W_R ротора выполняется в виде обыкновенной якорной обмотки с диаметральной шаг. Добавочные полюсы также имеют последовательную обмотку W_{dn} , соединяемую последовательно с компенсирующей обмоткой W_S , и шунтовую обмотку W_{ds} , соединенную обычно последовательно с обмоткой возбуждения, что позволяет иметь постоянное соответствие между потоком возбуждения и потоком, создаваемым шунтовой обмоткой добавочных полюсов коллекторного генератора. Как видно из рис. 78, в момент коммутации секция, имеющая диаметральный шаг, располагается в зоне добавочных полюсов. Вместо отдельных обмоток компенсирующей и добавочных последовательных полюсов проф. М. П. Костенко для машины с шестью явно выраженными полюсами предложена одна комбинированная обмотка с сокращенным шагом, описание которой будет дано ниже.¹

¹ См. также статью проф. М. П. Костенко — „Сборник ЛЭМИ“, № 2 (IV).

72. Электродвижущие силы коллекторного генератора Шербиуса. При неподвижном роторе генератора три пульсирующих потока, создаваемых обмоткой возбуждения, вызывают в обмотке ротора трансформаторную э. д. с. подобно обычному трансформатору, причем величина э. д. с. E_T равна:

$$E_T = 4,44 \omega_R k_{wt} f_1 \Phi \cdot 10^{-8}, \quad (46)$$

где ω_R — число витков в фазе обмотки, а k_{wt} — коэффициент обмотки по отношению к трансформаторной э. д. с.

Одновременно пульсирующий трехфазный поток будет индуцировать в компенсационной обмотке W_s э. д. с. E_s . Если генератор полностью компенсирован, то э. д. с. E_s и E_T должны быть равны и направлены навстречу (так же, как и в генераторе с неявно выраженными полюсами), благодаря чему при неподвижном роторе на зажимах рабочей цепи генератора э. д. с. E_2 окажется равной нулю.

При вращении ротора с некоторой постоянной скоростью в обмотке последнего, кроме трансформаторной э. д. с. E_T , будет индуцироваться э. д. с. вращения от пересечения проводниками пульсирующего потока. Картину индуцирования э. д. с. в роторе при его вращении можно разделить на две части, которые, затем, будучи наложены одна на другую, дадут реальную картину.

Чтобы получить первую часть указанной картины, нужно представить, что ротор стоит, и имеет место пульсирующий трехфазный поток (создается трансформаторная э. д. с. E_T). Для второй части нужно, наоборот, представить, что ротор вращается в постоянном потоке (получаем э. д. с. вращения E_0).

Электродвижущая сила вращения оказывается равной $E_0 = k \cdot n_0 \Phi$.

Очевидно, что в обмотке статора W_s индуцируется всегда трансформаторная э. д. с. $E_s = E_T$. Э. д. с. E_s и E_T направлены навстречу друг другу и поэтому взаимно компенсируются, в силу чего на зажимах генератора будет иметь место э. д. с. вращения $E_0 = k \cdot n_0 \Phi = E_2$. Частота последней определяется частотой f_1 тока возбуждения (частотой ключа-возбудителя), а величина — числом оборотов генератора и величиной потока Φ , которая устанавливается в зависимости от режима работы генератора (от зависимости момента на валу ведомых двигателей и от числа их оборотов). Таким образом, так же как и в генераторе с неявно выраженными полюсами, э. д. с. E_2 на зажимах генератора не будет зависеть от частоты тока возбуждения. Следует отметить, что и при круговом вращающемся поле можно рассматривать процесс индуцирования э. д. с. в роторе как индуцирование двух отдельных э. д. с.: трансформаторной (ротор стоит, поле вращается) и э. д. с. вращения (поток неподвижен, ротор вращается). Подобное рассмотрение для вращающегося поля было сделано при разборе э. д. с., индуцируемых в короткозамкнутой секции в период коммутации (см. § 68).

Очевидно что порядок следования фаз в главной цепи и связанное с ним направление вращения управляемых синхронных двигателей определяется порядком следования фаз в цепи возбуждения, который задается направлением вращения ключа-возбудителя. Для генератора Шербиуса с равномерным воздушным зазором при индукции под полюсами В э. д. с. вращения $E_0 = E_2$ может быть определена следующим образом:

$$E_0 = E_2 = 2 \frac{B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8}}{\sqrt{2}} \omega_R k_{wa} \cdot \alpha \cdot 10^{-8}, \quad (47)$$

где α — полюсная дуга, а k_{wa} — коэффициент обмотки якоря.

Для генератора с тремя полюсами на двойное полюсное деление и при обмотке с сокращенным шагом до $\frac{2}{3} \pi$ поток, выходящий из одного полюса, равен при $B = B_{\max}$

$$\Phi_{3p} = \frac{2}{3} \Phi,$$

где Φ — полный поток трехфазной системы, а Φ_{3p} — один из трех потоков, составляющих поток Φ ; коэффициент обмотки $k_{wa} = \frac{\sqrt{3}}{2}$. В этом случае э. д. с. вращения

$$E_{03} = \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_{3p} N \frac{p}{a} \frac{n}{60} \cdot 10^{-8} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Phi \cdot N \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot 10^{-8}. \quad (48)$$

При однофазном якоре и явно выраженных полюсах имеем так же как и при синусоидально распределенном потоке:

$$E_0 = \frac{p}{a} N \frac{\Phi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{n}{60} \cdot 10^{-8}, \quad (49)$$

где N — полное число проводников якоря.

Для трехфазной машины с шестью явно выраженными полюсами на двойное полюсное деление при обмотке с диаметральной шагм поток, выходящий из одного полюса, при $B = B_{\max}$ равен $\Phi_{6p} = \frac{1}{3} \Phi$, а коэффициент обмотки $k_{wa} = \frac{3}{2}$. В этом случае э. д. с. вращения

$$E_{03} = \sqrt{3} \Phi_{6p} \cdot N \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot 10^{-8} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \Phi \cdot N \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot 10^{-8}. \quad (50)$$

Следовательно, в трехфазной машине с тремя и шестью явно выраженными полюсами при одинаковых величинах потока получается одна и та же э. д. с. вращения E_{03} . При неявно выраженных полюсах при той же величине потока Φ э. д. с. вращения (E_2) получается при прочих равных условиях в $\frac{\sqrt{3}}{2} : \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{3}{2}$ раза больше, благодаря чему в последнем случае машина оказывается лучше использованной.

73. Коммутация в генераторе Шербиуса. В генераторе Шербиуса проводники коротко замыкаемой секции при коммутации располагаются, так же как и в машине постоянного тока, в нейтральной зоне между полюсами. Так как в машине нет кругового вращающегося поля благодаря явно выраженным полюсам, то между ними поле возбуждения отсутствует. Поэтому стороны короткозамкнутой секции при коммутации не пересекают, как это было в генераторе Костенко — Япольского, каких-либо магнитных линий от потока возбуждения и следовательно э. д. с. вращения E_d в короткозамкнутой секции при явно выраженных полюсах отсутствует. В ней возникает при коммутации, во-первых, реактивная э. д. с. от изменения величины тока при переключении из одной фазы в другую, и трансформаторная э. д. с., создаваемая пульсирующим потоком, охватываемым при коммутации короткозамкнутой секцией (рис. 77). Реактивная э. д. с. зависит от величины тока в рабочей цепи и поэтому, так же как и в машинах постоянного тока, может быть компенсирована при помощи последовательной обмотки добавочных полюсов.

Трансформаторная э. д. с. в короткозамкнутой секции с числом витков w_k равна:

$$e_T = 4,44 w_k (\pm f_1) \Phi \cdot 10^{-8}. \quad (51)$$

(Знаки $\pm$ зависят от порядка следования фаз).

Таким образом э. д. с. e_T не зависит от скорости вращения ротора, а только от частоты тока возбуждения, причем численное ее значение не зависит от порядка следования фаз. Для компенсирования трансформаторной э. д. с., если число периодов не велико ($f_1 < 20$), можно с успе-

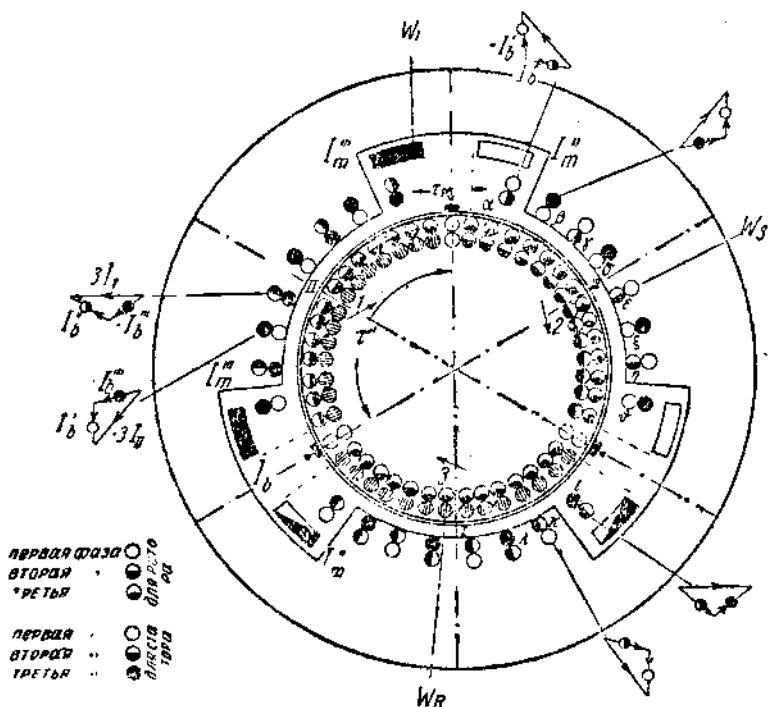


Рис. 79.

хом применить шумтовую обмотку добавочных полюсов. Однако при числе периодов большем $18 \div 20$ добавочные полюса становятся весьма громоздкими и поэтому практически невыполнимыми.

То обстоятельство, что величина трансформаторной э. д. с. не зависит от порядка следования фаз в обмотке возбуждения, сообщает машине Шербиуса ценное свойство: условия коммутации при вращении результирующего поля, составленного тремя отдельными пульсирующими полями (порядок следования фаз) как в направлении вращения машины, так и против него будут одинаковы. Как уже отмечалось, это позволяет реверсировать управляемые двигатели путем изменения порядка следования фаз в цепи возбуждения, т. е. без всяких переключений в главной цепи, что для синхронной передачи является весьма существенным, так как какие-либо переключения в главной цепи понижают степень надежности синхронизации двигателей или

требуют каких-либо дополнительных устройств, обеспечивающих эту надежность.

74. Главные обмотки машины Шербиуса. Обмотка ротора генератора выполняется по типу обмоток машин постоянного тока, т. е. двухслойной. Как уже отмечалось, при трех полюсах шаг обмотки укорочен до $\frac{2}{3}$ полюсного деления.

На рис. 79 схематически изображена машина Шербиуса с главными обмотками: возбуждения W_1 , компенсирующей W_2 и ротора W_R (обмотки добавочных полюсов не изображены). Верхний и нижний слои части обмотки между двумя щетками принадлежат различным фазам, например, если верхний слой принадлежит началам секций первой фазы (I), то нижний слой представляет собой концы секций третьей фазы (III). Поэтому сдвиг токов по фазе между верхним и нижним слоями равен 60° (в однослойной обмотке соседние проводники разных фаз несут токи, сдвинутые по фазе на 60°).

Таким образом, м. д. с., создаваемая частью обмотки, находящейся под одним полюсом, является результатом сложения двух м. д. с., сдвинутых по фазе на 60° , как это изображено на рис. 80. Здесь под началами первой фазы лежат концы третьей фазы, направление тока в проводах которых сдвинуто на 180° относительно тока в проводах начал третьей фазы, имеющей сдвиг относительно первой фазы на $\frac{4\pi}{3} = 240^\circ$.

Для отдельных частей обмотки ротора имеем (см. рис. 79):

Часть обмотки	II $\rightarrow$ 1	III $\rightarrow$ 2	I $\rightarrow$ 3
Фаза тока в проводниках верхнего слоя . .	I_{II}	I_{III}	I_I
Фаза тока в проводниках нижнего слоя . .	$-I_I = I_1$	$-I_{II} = I_2$	$-I_{III} = I_3$

Из рис. 80 видно, что результирующая м. д. с. под каждым из полюсов будет сдвинута относительно м. д. с., ее составляющих, на 30° .

Следствие укороченного шага до $\frac{2}{3}$ полюсного деления обмотка ротора создает м. д. с. с весьма сильно выраженными гармониками. На рис. 81 представлено распределение м. д. с. якоря генератора с четырьмя полюсными делениями для нескольких моментов времени, отличающихся друг от друга на 30° .

Резкое изменение формы м. д. с. (наличие значительных пространственных гармоник) требует в целях безыскровой коммутации, чтобы компенсирующая обмотка уничтожала не только основную гармонику, но и все остальные, т. е. создавала бы м. д. с., представляющую собой зеркальное отражение м. д. с. ротора для любого момента времени.

С этой точки зрения весьма подходящим было бы применение однослойной компенсирующей обмотки по типу разрезанной обмотки Грамма, фазы которой соединены в звезду. В таком случае токи в соответствующих фазах статора и ротора будут сдвинуты друг относительно друга на 150° , а не на 180° . Поэтому м. д. с. компенсирующей обмотки и результирующие м. д. с. ротора I—3; II—1; III—2 оказываются

сдвинутыми на 180° , благодаря чему имеет место в любой момент времени полная компенсация поля реакции якоря. Однако выполнение подобной однослойной обмотки на статоре связано с большими конструктивными и экономическими затруднениями. Поэтому приходится применять двухслойную или трехслойную обмотку, которая по своему действию эквивалентна с большим или меньшим приближением к однослойной грамовской обмотке.

Казалось бы, что удовлетворительной могла бы быть двухслойная обмотка, состоящая из двух частей, сдвинутых в пространстве одна относительно другой на угол $\frac{\pi}{3}$ и соединенных последовательно. Такая обмотка

идентична обмотке ротора, т. е. результирующая м. д. с., составленная из отдельных м. д. с. двух частей обмотки статора, будет равна м. д. с. ротора.

Однако если фазы указанной обмотки соединить в звезду, что, как уже отмечалось, только и может быть практически приемлемым, то тогда м. д. с. статора сдвинется по фазе на 30° относительно м. д. с. ротора. Это не может быть допущено, так как (рис. 81) отдельные значения м. д. с. ротора, отличающиеся во времени на 30° , сильно разнятся друг от друга.

Таким образом необходимо, чтобы компенсирующая обмотка была барабанной (по условиям выполнения), затем соединена в звезду и, наконец, полностью компенсировала реакцию якоря в каждый данный момент времени.

В силу указанных требований компенсирующая обмотка получается довольно сложной и имеющей невысокий результирующий коэффициент обмотки, что требует большего количества меди, чем обмотки с нормальными обмоточными коэффициентами (обмотка с диаметральным шагом).

Решение должно лежать в плоскости применения обмотки статора с двумя цепями, из которых каждая идентична роторной обмотке и сдвинута относительно другой в пространстве на 60° . Тогда результирующая м. д. с. сдвинется относительно м. д. с. каждой из цепей на 30° . Соединение обмотки статора звездой даст также сдвиг м. д. с. на 30° , т. е. м. д. с. статора и ротора окажутся сдвинутыми ровно на 180° и будет иметь место полная компенсация, если сделать так, чтобы та цепь обмотки статора, в сторону которой произошел сдвиг на 60° указанным путем, будет расположена против соответственной части обмотки ротора.

Практически компенсирующая обмотка машины Шербиуса выполняется в виде одной двухслойной обмотки с укороченным шагом до $\frac{2}{3}\tau$ и двумя ветвями, сдвинутыми в пространстве на $\frac{\pi}{3}$ и соединенными особым обра-

зом. На рис. 79, схематически изображающем машину Шербиуса, дана одна из форм выполнения компенсирующей обмотки. Последняя имеет вид барабанной обмотки с $2u_n$ (обычно 2) проводниками на паз. Так как обмотка должна соединяться в звезду, то она обтекается током I_2 , находящимся в фазе с током I_b , поступающим со щеток (т. е. это и есть соб-

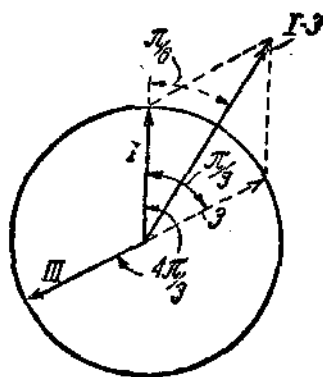


Рис. 80.

ственно ток I_b), а не с физическим током I обмотки ротора (рис. 82). Обмотка обладает $6q = 30$ равномерно расположенными по окружности пазами (действительными или подразумеваемыми), приходящимися на 360° . В данном случае в каждом полюсном промежутке имеются два заполненных паза и два незаполненных (место расположения последних указано

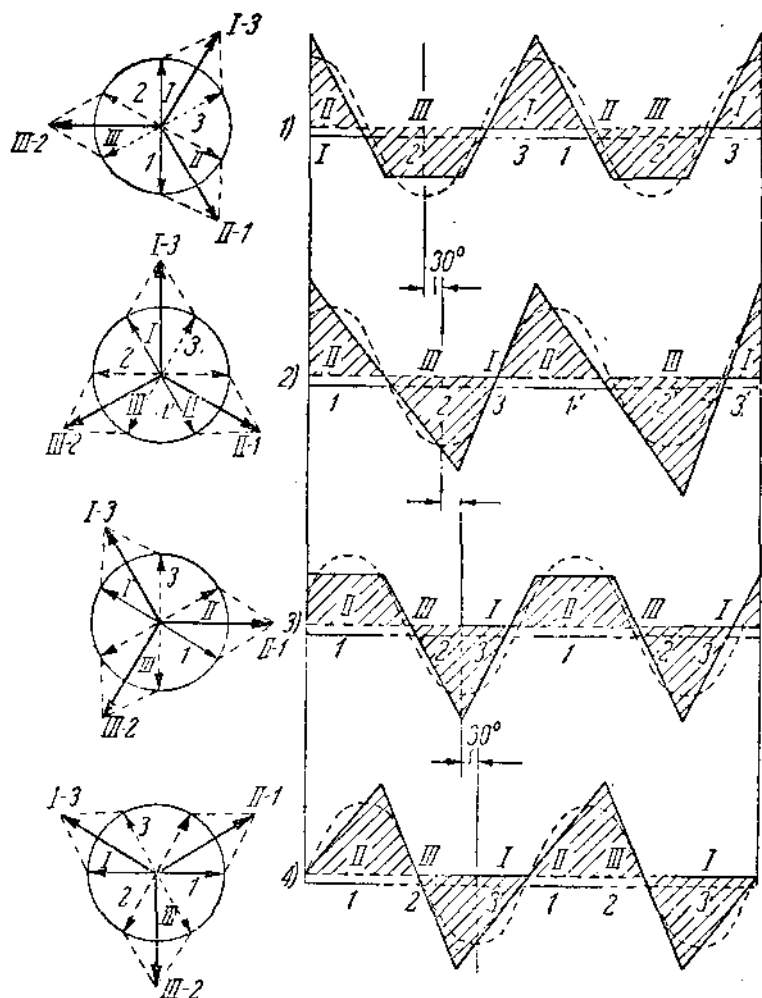


Рис. 81.

пунктиром). Токи в двух проводниках, лежащих друг над другом в одном пазу, сдвинуты по фазе друг относительно друга на 60° . Следовательно, результирующая м. д. с. каждого паза сдвинута по фазе относительно м. д. с. каждого проводника в пазу на 30° (см. рис. 79, где даны для каждого паза суммы векторов м. д. с., представленных в виде векторов токов). Включение на звезду дает сдвиг на 30° м. д. с. статора, благодаря чему м. д. с. статора и ротора окажутся прямо противоположны. Геометрическая сумма м. д. с. одного паза статора равна утроенной м. д. с.,

создаваемой одним проводником ротора. Действительно: линейный ток ротора, проходящий по обмотке статора, равен: $I_b = I_R = \sqrt{3}I$, где I — фазный ток ротора. Геометрическая сумма м. д. с. паза или, что то же, сил токов его проводников, равна $\sqrt{3}I_2$. Отсюда имеем, что ток паза равен $3I$ (рис. 79). Фазы в компенсирующей обмотке на каждый полюс введены в следующем соотношении: проводников той же фазы, которую имеет и данный полюс, приходится число равным $2(q-1)$. В данном случае 8. Проводников двух других фаз на этот же полюс в половину меньше (в нашем случае по четыре). Проводники в пазах расположены таким образом, чтобы их лобовые части могли образовать подобие обычной петлевой обмотки.

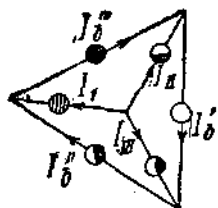


Рис. 82.

На рис. 83 даны диаграммы G6rges'a для м. д. с. обмотки ротора и компенсирующей обмотки статора. В случае идеальной компенсации треугольники (трехфазная обмотка) м. д. с. должны совпадать при противоположном направлении векторов м. д. с. Для рассматриваемой конкретной обмотки такого полного совпадения нет, так как число пазов на статоре взято меньше и затем шесть пазов вовсе не заполнены (помечены пунктиром). Каждая сторона треугольника м. д. с. статора состоит из $\frac{6q-6}{3}$ векторов (в нашем случае восьми) по числу заполненных пазов, проходящих на полюс. Если бы были заполнены также пазы между главными полюсами, обозначенные пунктиром, то мы имели бы на каждую сторону $\frac{6b}{3} = 2q$ векторов (положение этих дополнительных векторов указано пунктиром на рис. 83).

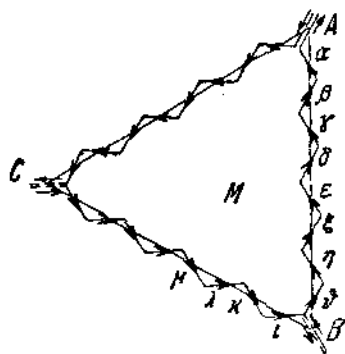


Рис. 83.

Обозначим дугу окружности, находящуюся между двумя щетками, через τ' , а шаг по пазам — через τ_z . Тогда удельную загрузку для компенсирующей обмотки можем определить так:

$$AS_k = \frac{3 I_2}{2 \tau_z} = I_2 \frac{3q}{\tau'} \quad (52)$$

Удельная загрузка ротора с Q пазами по $2u_{nR}$ проводников в каждом может быть определена следующим образом:

$$AS_R = I_b \frac{Q \cdot u_{nR}}{3 \tau'}$$

Для полной компенсации необходимо, чтобы $AS_k = AS_R$. Тогда, приняв во внимание, что $I_2 = I_b$ (один и тот же ток при последовательном соединении щеток и фаз компенсирующей обмотки статора), будем иметь

$$9q = Q \cdot u_{nR}$$

(в нашем частном случае при $q = 5$

$$Q \cdot u_{nR}$$

должно быть равно 45).

Благодаря тому, что на роторе применена обмотка с сокращенным шагом до $\frac{2}{3}\tau$, нужно вводить в выражение для э. д. с. и м. д. с. этой обмотки обмоточный коэффициент сокращения шага k_R , равный 0,867.¹

В компенсирующей обмотке статора, кроме того же сокращения шага, имеются две ветви со сдвинутыми в пространстве м. д. с. на 60° , благодаря чему результирующий коэффициент сокращения шага k_s этой обмотки равен 0,75. Наличие подобных коэффициентов (в особенности последнего) свидетельствует о недостаточном использовании меди обмоток.

Приведенные значения коэффициентов получены в предположении, что машина имеет вращающееся синусоидальное поле. В генераторе Шербиуса в действительности имеют место три отдельных пульсирующих поля, сдвинутых во времени на 120° . Кроме того, индукция под полюсами постоянна вследствие одинаковой величины зазора. Поэтому надлежит обмоточные коэффициенты устанавливать отдельно как для э. д. с. вращения ротора, так и для трансформаторной э. д. с. ротора и статора.² Соответствующие подсчеты дают: 1) обмоточный коэффициент для э. д. с. вращения в роторе машины Шербиуса равен 0,867; 2) коэффициент обмотки для трансформаторной э. д. с. ротора равен 0,5; 3) коэффициент компенсирующей обмотки статора достигает лишь 0,433.

75. Обмотки добавочных полюсов в машине Шербиуса. Уже отмечалось, что добавочные полюса генератора Шербиуса имеют последовательную обмотку для компенсации реактивной э. д. с. в короткозамкнутой секции и шунтовую для компенсации трансформаторной э. д. с. в ней. Последовательная обмотка добавочных полюсов по существу представляет часть (продолжение) компенсирующей обмотки статора. Назначение обеих обмоток — создавать ампервитки, направленные навстречу ампервиткам реакции якоря, причем в зоне коммутации поле статора должно превалировать над полем ротора (рис. 76). Поэтому последовательная обмотка добавочных полюсов должна выполняться по тому же принципу, что и компенсирующая обмотка, а именно — состоять из двух ветвей, питаемых токами двух фаз, из которых одна соответствует основному направлению тока в первой фазе, а вторая — вывернутому на 180° направлению тока во второй фазе, для получения двух м. д. с., сдвинутых на 60° по фазе, так же как и в компенсирующей обмотке.

Последовательную обмотку добавочных полюсов можно выполнить или в виде обмотки по типу обмоток добавочных полюсов машин постоянного тока, т. е. в виде обмотки, окружающей непосредственно добавочный полюс, или же в виде одной общей обмотки с компенсирующей обмоткой, имеющей добавочные проводники в зоне коммутации, делающие поле этой обмотки в указанной зоне сильнее поля реакции.

Так как в машине Шербиуса коммутация происходит одновременно в верхнем и нижнем слоях, то в выражение для реактивной э. д. с. должен войти коэффициент, учитывающий ее увеличение благодаря указанному обстоятельству. В машине постоянного тока этот коэффициент равнялся бы 2; в данном случае э. д. с. увеличивается только в $\left(1 + \cos \frac{\pi}{3}\right)$, так как токи в верхнем и нижнем слоях сдвинуты по фазе на 60° .

¹ См. статью проф. М. П. Костенко — „Сборник ЛЭМИ“, № 4. Коллекторный компенсированный альтернатор с неявно- и явновыраженной системой возбуждения переменного тока.

² См. ту же статью.

В результате необходимая индукция под добавочным полюсом оказывается равной

$$B_g' = -\frac{3}{\sqrt{2}} AS \lambda_s \frac{i_{zR}}{i_{zR} + b_D - r_D}, \quad (53)$$

т. е. в $\sqrt{3}$ раз больше, чем при коммутации в одном слое [см. § 70, форм. (40)].

Шунтовая обмотка добавочных полюсов, как уже отмечалось, включается последовательно с обмоткой возбуждения машины. (Имеет две ветви со сдвигом по 60°).

Наличие шунтовой обмотки по существу для короткозамкнутой секции превращает генератор Шербиуса в генератор с неявновыраженными полюсами, так как в короткозамкнутой секции одновременно индуцируется и э. д. с. вращения и трансформаторная э. д. с., которые в сумме должны давать нуль. При изменении порядка следования фаз направление тока в шунтовой обмотке должно быть изменено на обратное с тем, чтобы и в этом случае имела место разность указанных э. д. с., а не сумма. Надлежащей регулировкой величины поля шунтовой обмотки добавочных полюсов можно при всех частотах уравновесить обе э. д. с. таким образом, чтобы их сумма равнялась нулю. Трансформаторная э. д. с. в короткозамкнутой секции равна

$$e_T = 4,44 \omega_k \Phi f_1 \cdot 10^{-8}. \quad (54)$$

Электродвижущая сила вращения, создаваемая в указанной секции полем шунтовой обмотки с индукцией B_1'' , равна

$$e_k'' = 2 \sin \frac{\pi}{3} \omega_k \frac{B_g''}{\sqrt{2}} l \cdot v \cdot 10^{-8} = \sqrt{3} \omega_k \frac{B_g''}{\sqrt{2}} l \cdot v \cdot 10^{-8}. \quad (55)$$

При правильной коммутации э. д. с. e_k'' должна быть при всех режимах равна и прямо противоположна э. д. с. e_T . Отсюда индукция потока шунтовой обмотки

$$B_g'' = \frac{2 \pi f_1 \Phi}{\sqrt{3} \cdot l \cdot v}. \quad (56)$$

76. Обмотки коллекторного генератора с шестью явновыраженными полюсами на двойное полюсное деление. В генераторе с шестью явновыраженными полюсами на двойное полюсное деление (см. рис. 78) на роторе обмотка получается с диаметральной шаг, что даст м. д. с., довольно мало отличающуюся от синусоидальной. Соответственно выше, чем в трехполусной машине, получается и обмоточный коэффициент. Компенсирующая обмотка статора, так же как и в трехполусной машине, должна быть выполнена из двух идентичных с ротором обмоток, сдвинутых в пространстве на 60° . Компенсирующая обмотка обычно выполняется в виде простой катушечной обмотки.

Последовательная обмотка добавочных полюсов по принципу устройства не отличается от подобной обмотки в машине с тремя явновыраженными полюсами. Проводники ее могут быть расположены сосредоточенным образом вокруг добавочного полюса или же быть распределенными. Последний метод выполнения последовательной обмотки добавочных полюсов изображен на рис. 84, где показана также одна фаза компенсирующей обмотки, имеющей диаметральный шаг, в то время как последовательная обмотка

имеет весьма укороченный шаг (соединения на рис. 84 соответствуют первой фазе, изображенной кружками).

Шунтовая обмотка добавочных полюсов должна создавать поток, фаза которого является средней по отношению к двум соседним полюсам возбуждения (т. е. сдвинуты от последних на 30° во времени), так как наличие добавочных полюсов должно по существу превращать для короткозамкнутых секций рассматриваемый генератор в машину с неявновыраженными полюсами. Для создания такого сдвига в 30° выполняют шунтовую обмотку с двумя ветвями, токи в которых сдвинуты во времени на 60° , для чего одна ветвь соединяется последовательно с предыдущим полюсом возбуждения, а вторая — с последующим полюсом. Для осуществления сдвига на 30° можно также на каждом полюсе иметь только одну обмотку, но тогда нужно соединить шунтовые обмотки всех трех фаз добавочных полюсов в треугольник, если главная обмотка возбуждения соединена в звезду. В этом случае требуется

на каждом полюсе $\sqrt{\frac{3}{2}} = 0,867$ витков от того числа витков, которое требуется при первом способе. Это объясняется тем, что в первом случае м. д. с. двух ветвей складывается алгебраически.

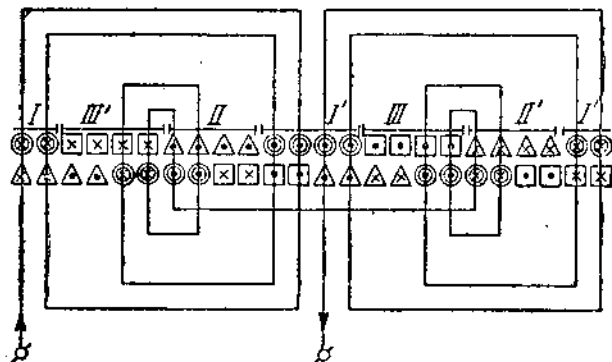


Рис. 84.

Коммутирующее поле последовательных добавочных полюсов в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем поле машины Шербиуса с тремя явновыраженными полюсами, так как в последней коммутируются одновременно верхний и нижний слои обмотки, а в первой только один из этих слоев.

Значение требуемой индукции от последовательной обмотки равно (так же, как и в машинах с неявновыраженными полюсами).

$$B_g' = \sqrt{\frac{3}{2}} AS \lambda_s \frac{t_{zR}}{t_{zR} + I_D - \beta_D}. \quad (40)$$

Ампервитки на один полюс, необходимые для проведения коммутирующего потока через воздушный зазор δ_g и железо, равны:

$$AW_g' = 0,8 B_g' \delta_g k \quad (41)$$

(коэффициент k учитывает увеличение магнитного сопротивления от железа).

В шестиполюсной машине имеется удвоенное количество добавочных полюсов по сравнению с трехполюсной; поэтому общее число ампервитков всех добавочных полюсов в этой машине будет в $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15$ раза больше, чем в машине Шербиуса. Трансформаторная э. д. с. в короткозамкнутой секции:

$$e_T'' = \pi \sqrt{2} \omega_k (2 \Phi_p) f_1 \cdot 10^{-8} = \pi \sqrt{2} \omega_k \Phi f_1 \cdot 10^{-8}, \quad (57)$$

где Φ_p — поток одного полюса.

Коммутирующая э. д. с. от шунтовой обмотки добавочного полюса

$$e_k'' = 2 w_k \frac{B_g''}{\sqrt{2}} l \cdot v \cdot 10^{-8}. \quad (58)$$

При правильной коммутации

$$B_g'' = \pi f_1 \cdot \frac{\Phi}{l \cdot v}. \quad (59)$$

Ампервитки шунтовой обмотки добавочного полюса определяются таким же образом, как и выше:

$$AW_g'' = 0,8 B_g'' \cdot \delta_g \cdot k.$$

ГЛАВА XIII.

КОЛЛЕКТОРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ.

(Дополнительные сведения.)

77. Компенсирующая и коммутирующая обмотка проф. М. П. Костенко. Проф. М. П. Костенко предложил ¹ комбинированную обмотку, выполняющую одновременно как функции компенсации, так и функции коммутирования в отношении реактивной э. д. с. секции. Эта обмотка может быть применена в коллекторном компенсированном генераторе с шестью добавочными полюсами на двойном полюсном делении (как

с явно выраженными полюсами возбуждения, так и с неявно выраженными полюсами, создающими круговое вращающееся поле).

Обмотка состоит из двух ветвей, последовательно соединенных и сдвинутых друг относительно друга на 60 электрических градусов. Существенным в предложении является то, что шаг обмотки укорочен до половины полюсного деления.

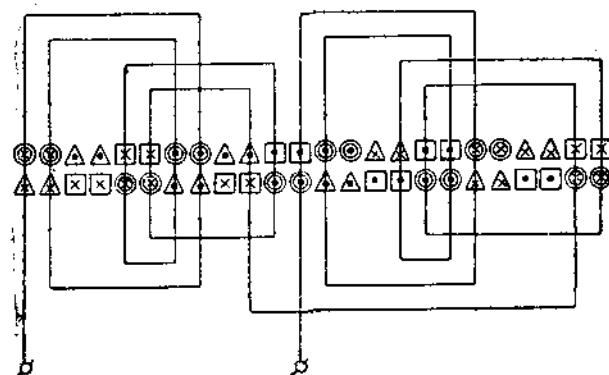


Рис. 85.

Конструктивно обмотка выполняется по методу двухплоскостной трехфазной обмотки. В производственном отношении наличие двух ветвей в каждом пазу, принадлежащих различным фазам, не является особенно сложным, так как обе ветви идут по всем пазам идентично.

Подобная схема по существу применяется в двигателях с переключением полюсов и имеет две соединенные последовательно ветви, м. д. с. которых сдвинуты во времени на 60°. На рис. 85 представлено распределение проводников одной фазы обмотки проф. Костенко. Все катушки обмотки имеют одинаковые шаги, в то время как в обмотках, до сих пор приме-

¹ Заявочное свидетельство № 118 538 от 14 ноября 1932 г.

являющихся, имеются катушки с разными шагами (компенсирующая обмотка и последовательная обмотка добавочных полюсов). Если сопоставить схемы рис. 84 и 85, то окажется, что обмотка рис. 85 является технической модификацией обмотки рис. 84, так как в отношении распределения токов по окружности статора изменений никаких нет. На рис. 84 добавочные

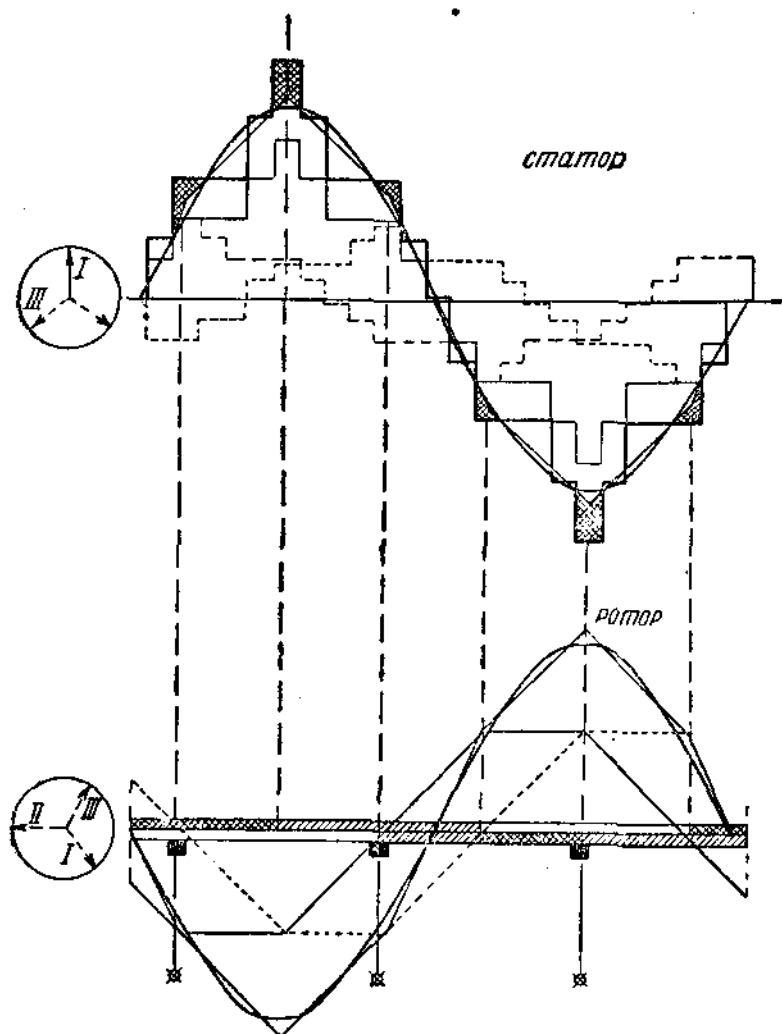


Рис. 86.

последовательные полюса образуются специальными катушками с сильно укороченным шагом, в то время как в схеме по рис. 85 те же добавочные полюса образованы сторонами катушек одной общей обмотки с шагом, равным половине полюсного деления.

Ранее уже отмечалось, что компенсирующая обмотка с двумя ветвями, м. д. с. которых сдвинуты во времени на 60° , создает требуемую компен-

сацию реакции якоря в каждый момент. Кроме того и для коммутационной зоны нужна коммутирующая м. д. с., образованная двумя м. д. с., сдвинутыми на 60° . Таким образом, обмотка, предложенная проф. Костенко, оказывается удовлетворяющей требованиям и компенсации реакции якоря и коммутации короткозамкнутой секции.

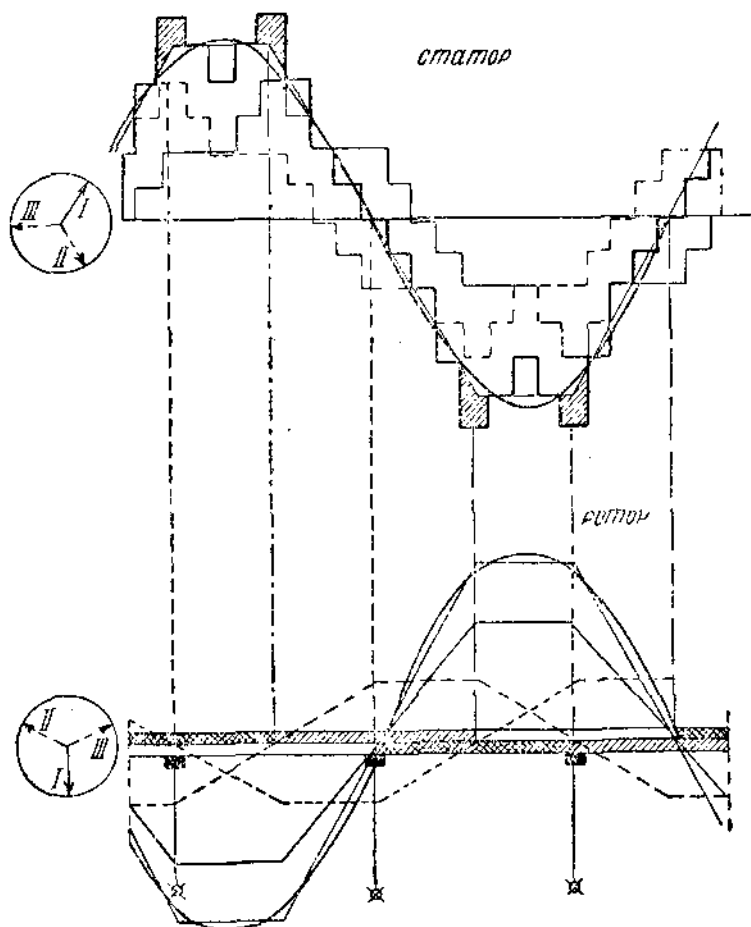


Рис. 87.

На рис. 86 и 87 представлено взаимное расположение м. д. с. обмоток статора и ротора для двух моментов времени, отличающихся на 30° . Приведенные кривые показывают, что обмотка статора создает не только м. д. с., полностью компенсирующую м. д. с. ротора (зеркальное ее изображение), но также создает в коммутационных зонах коммутирующие поля (на рис. 86 и 87 заштрихованные участки), компенсирующие реактивную э. д. с. в короткозамкнутой секции.

Большим преимуществом предложенной обмотки является то обстоятельство, что все проводники, как принадлежащие компенсирующей обмотке,

так и последовательной обмотке добавочных полюсов, распределены совершенно равномерно по всей окружности машины. Равномерное заполнение пазов проводниками дает лучшее использование машины, так как получается равномерный нагрев проводников, чего нет при применении обычных обмоток — компенсирующей и последовательной добавочных полюсов, благодаря тому что в этом случае имеет место сосредоточивание проводников в пазах, находящихся рядом с добавочными полюсами.

Вместе с тем предложение укорочения шага обмотки облегчает ее конструкцию и производственное выполнение.

78. Система фирмы Виккерс. Инж. Япольский (фирма Виккерс) видоизменил цепь возбуждения коллекторного генератора с возбуждением со статора с целью получения неизменного или увеличивающегося потока

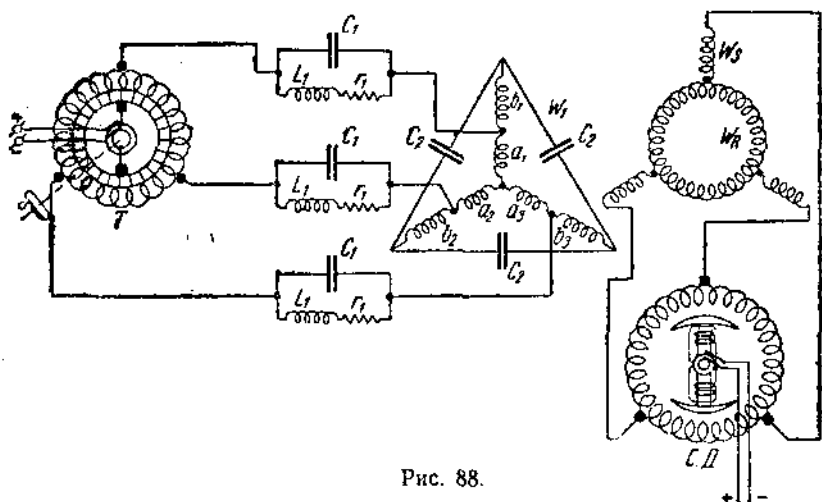


Рис. 88.

возбуждения при неизменном напряжении на зажимах возбудителя и меняющейся частоте. Особенность системы (рис. 88) заключается в компенсации реактивного сопротивления в цепи возбуждения емкостным, что позволяет при увеличивающейся частоте общему сопротивлению цепи возбуждения удерживаться примерно на одном значении и даже уменьшаться. Таким образом, значение тока возбуждения может быть установлено примерно неизменным при соотношении

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega c} \right)^2}}.$$

Перед обмоткой возбуждения включены смешанные сопротивления C_1, L_1, r_1 , сама же трехфазная обмотка возбуждения состоит из двух параллельно-соединенных частей a_1, a_2, a_3 и b_1, b_2, b_3 , из которых часть a_1, a_2, a_3 непосредственно замкнута на звезду, а часть b_1, b_2, b_3 через емкостные сопротивления соединена в треугольник. В качестве ключа применен преобразователь T постоянного тока в трехфазный переменный с вращающимися щетками (конструкции Япольского). При неподвижном ключе постоянный ток будет проходить через сопротивления L_1, r_1 и часть a_1, a_2, a_3 .

обмотки возбуждения, так как сопротивление конденсаторов бесконечно велико для постоянного тока. При вращении ключа сопротивления C_1 и C_2 с увеличением частоты начнут уменьшаться, в то время как индуктивные будут расти. Ток возбуждения теперь будет проходить и через часть b_1 , b_2 , b_3 . Параметры цепи возбуждения могут быть подобраны так, что с увеличением скорости вращения ток возбуждения будет оставаться постоянным или расти с увеличением частоты, что позволяет применить возбуждатель с неизменным напряжением. Можно заставить расти возбуждение в зависимости от частоты еще интенсивнее путем применения в цепи постоянного тока ключа вольтодобавочной машины с независимым возбуждением. Указанная машина включается таким образом, что наведенная в ней э. д. с. вычитается из напряжения сети при неподвижном ключе. При его вращении автоматически производится уменьшение возбуждения вольтодобавочной машины, а, следовательно, увеличение подводимого к возбуждательному напряжению постоянного тока.

79. Сравнение коллекторных генераторов с явно- и неявно-выраженными полюсами. Из изложенного выше следует, что коллекторный генератор с явновыраженными полюсами может строиться на сравнительно низкую частоту (до $18 \div 22$ Hz), так как иначе шунтовые добавочные полюса получаются весьма громоздкими.

Генератор с неявновыраженными полюсами, наоборот, не имеет такого ограничения в отношении предельной частоты, потому что шунтовые добавочные полюса оказываются значительно меньше, благодаря тому что в короткозамкнутой секции действует (при согласном вращении поля и ротора) разность э. д. с. вращения и трансформаторной. В частности при $f_1 = f_0$ (возбуждение со статора) необходимость в шунтовых добавочных полюсах вовсе отсутствует (при высоких частотах). Однако это благоприятное обстоятельство связано с довольно существенным недостатком генератора с неявновыраженными полюсами, так как благоприятные условия коммутации получаются лишь при согласном вращении поля и ротора. При вращении их в противоположные стороны коммутация оказывается значительно ухудшенной и по сравнению с генератором с явновыраженными полюсами, благодаря чему такой режим получается практически неприемлемым. Следовательно, генератор с неявновыраженными полюсами не допускает перемены порядка следования фаз путем реверсирования поля возбуждения относительно ротора. Это влечет за собой, как уже отмечалось, необходимость при реверсировании управляемых двигателей переключения питающих их проводов, что иногда весьма неудобно. Условия коммутации в генераторе с явновыраженными полюсами остаются одинаковыми при любом порядке следования фаз в цепи возбуждения. Поэтому реверсирование управляемых двигателей в этом случае может быть осуществлено изменением порядка следования фаз в цепи возбуждения, т. е. без каких-либо переключений в главной цепи. Таким образом, выбор того или иного типа генератора зависит от условий работы двигателей, предполагаемых к питанию от генератора. В случае не особенно часто производимого в спокойных условиях реверсирования может быть применен генератор с неявновыраженными полюсами. В случае же частых и быстрых реверсирований (большая часть синхронных передач и вообще приводов с быстро следующими разгонами, остановками и реверсированием приводного двигателя) должно применять генератор с явновыраженными полюсами. Следует отметить, что

коллекторный генератор в конструктивном отношении, благодаря хорошей коммутации, является более совершенным (компактным), чем все остальные многофазные коллекторные машины.

80. Различные применения коллекторного генератора. Кроме синхронной передачи коллекторный генератор переменной частоты нашел себе применение и в некоторых других областях, о которых надлежит упомянуть для общности картины возможных применений этого генератора.

Весьма сложный и важный вопрос о регулировании числа оборотов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором путем изменения их частоты на зажимах удачно разрешается при питании их от генератора переменной частоты. Применение генератора с явновыраженными полюсами для этой цели впервые было предложено Шербиусом,¹ а генератора с неявновыраженными полюсами разработано М. П. Костенко и Н. Япольским.² Подобная схема генератора с асинхронными двигателями может найти широкое применение в схемах автоматического управления производственными и другими процессами, области весьма близкой к области синхронной передачи и иногда непосредственно вливающейся в последнюю (синхронная передача дает строго синхронное перемещение в каждый данный момент работы, в то время как схема автоматического управления процессами поддерживает какую-либо определенную зависимость между последними, приходя в действие при отклонении их от нормы).

Схема питания асинхронного двигателя от коллекторного генератора переменной частоты дает систему переменного тока подобную системе Леонарда постоянного тока, с той разницей, что в первом случае в качестве двигателя применена такая исключительно простая, дешевая, надежная и не требующая ухода машина, как асинхронный короткозамкнутый двигатель, что особенно важно в условиях безнадзорной работы механизма.

Кроме того, коллекторный генератор типа Шербиуса применяется рядом фирм (BBC, GEC, Томсон Гаустон, ACEA, SSW)³ и в качестве регулирующей машины в каскадах с большими асинхронными двигателями для регулирования скорости последних. Применяют также подобные генераторы в схемах для связи сетей различных частот и в качестве шунтовых компенсаторов фазы, служащих для компенсации коэффициента мощности больших асинхронных двигателей и возбуждения асинхронных компенсаторов. Наибольшая мощность машин Шербиуса доходит до 1000 kVA при 375 об/мин и числе полюсов $3p = 21$ (150 kVA на двойное полюсное деление).

Фирмы AEG и Альзасское о-во для тех же целей, что и выше, применяют коллекторный генератор с шестью явновыраженными полюсами на двойное полюсное деление. Максимальная мощность этой машины в выполненных установках для связи двух сетей различных частот достигает 600 kVA при 500 об/мин (100 kVA на двойное полюсное деление).

Коллекторный генератор с неявновыраженными полюсами с возбуждением на статоре применяет фирма Саксенверк в качестве возбудителя для асинхронных компенсаторов и в качестве шунтового компенсатора фазы.

Генератор этого же типа, но с возбуждением на роторе, применяется фирмами SSW и Вестингауза для связи сетей двух частот, в каскадных

¹ Английский патент № 11817 от 1906 г.

² Сов. патент № 1335 от 1926 г.

³ См. статью проф. М. П. Костенко — „Сборник ЛЭМИ“, № 4.

установках, для возбуждения асинхронных компенсаторов, в качестве компенсаторов фазы с независимым возбуждением для улучшения коэффициента мощности больших асинхронных двигателей. Максимальная мощность этой машины в выполненной установке для связи сетей двух частот достигает 375 kVA при 300 об/мин., (37,5 kVA на пару полюсов).

ГЛАВА XIV.

ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕРАТОРА ПО ТИПУ БЕСКОЛЛЕКТОРНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ МАШИНЫ.

81. Общие замечания. Схема синхронной передачи с коллекторным генератором переменной частоты позволяет управлять при помощи легкого ключа-возбудителя синхронными двигателями большой мощности. Мощность коллекторного генератора должна быть равна сумме мощностей всех питаемых от генератора синхронных двигателей. Известным недостатком подобной схемы является наличие дорого стоящей коллекторной машины большой мощности, довольно сложной по выполнению. В некоторых случаях, когда не нужна большая точность в синхронной связи или в случаях автоматического управления какими-либо процессами при помощи синхронных или асинхронных двигателей, работающих на переменной частоте, могут быть применены схемы с бесколлекторной индукционной машиной в качестве источника переменной частоты. В этом случае индукционная машина, питающая управляемые двигатели, пропускает через себя всю мощность, идущую на питание двигателей. Получение переменного тока переменной частоты от подобной машины может осуществляться или за счет применения какого-либо возбудителя переменной частоты при неизменном числе оборотов индукционной машины, вращаемой каким-либо первичным двигателем, или же путем изменения числа оборотов индукционной машины при неизменной частоте возбуждения.

82. Схема проф. М. П. Костенко. Предложенная проф. М. П. Костенко¹ схема с индукционной машиной может быть применена в том случае, когда двигатель, питаемый током переменной частоты, вращается в каком-либо определенном направлении или когда изменение направления вращения этого двигателя может производиться путем переключения проводов в главной цепи. Кроме того, подобная система возможна к применению лишь там, где не является существенным строго фиксированное положение валов двигателей при покое.

Система представляет собой дальнейшее развитие схемы переменной частоты с коллекторным генератором, предложенной Костенко и Япольским.

Сущность предложения заключается в том, что коллекторный генератор питает двигатели током переменной частоты не непосредственно, а через своего рода усилитель в виде генератора по типу индукционной машины, вращаемой первичным двигателем с неизменной скоростью. Таким образом, коллекторный генератор доставляет лишь мощность возбуждения (мощность скольжения), составляющую в вольт-амперах некоторую часть мощности,

¹ Заявочное свидетельство № 118537 от 14 ноября 1932 г., по которому состоялось постановление о присуждении авторского свидетельства.

поступающей для питания двигателей. Так как генератор переменной частоты по типу индукционной машины может быть вообще построен на значительно большую мощность, чем коллекторный генератор, то рассматриваемая система тем самым может быть выполнена принципиально на большую мощность, чем система с непосредственным питанием двигателей от коллекторного генератора. Здесь интересно проследить развитие идеи увеличения мощности генераторов переменной частоты (мощности синхронной передачи) при сохранении малой мощности ключа-возбудителя. Исходной системой является схема питания синхронных двигателей от ключа. Следующий шаг это — помещение между ключом и синхронными двигателями усилителя в виде коллекторного генератора переменной частоты, получающего мощность не от ключа, а от первичного двигателя и управляемого ключом-возбудителем. Далее, с целью сохранения малой мощности

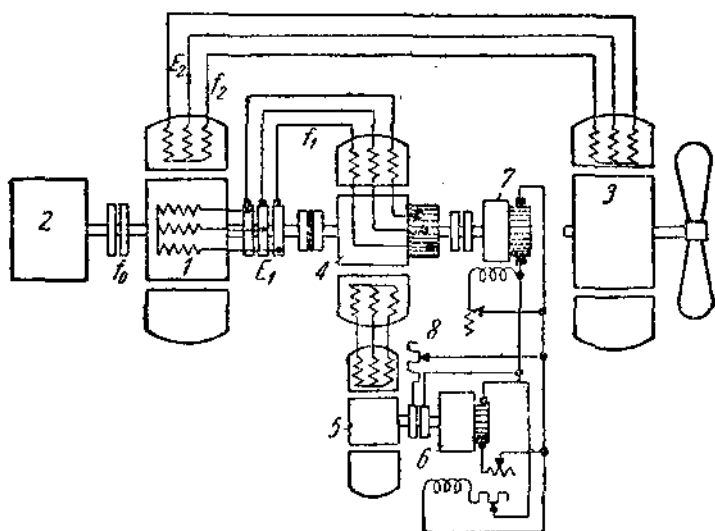


Рис. 89.

ключа-возбудителя генератора, между последним и ключом вставляется промежуточный возбудитель (см. § 66), выполненный в виде коллекторного генератора меньшей мощности (см. рис. 71). Эта же система может быть развита в систему с числом большим, чем один промежуточный коллекторный генератор-возбудитель. Наконец, дальнейшим этапом развития указанной идеи является рассматриваемая схема, по которой между коллекторным генератором и приемниками вставляется бесколлекторный генератор переменной частоты в виде индукционной машины, позволяющий еще больше увеличить мощность системы с переменной частотой. Однако следует отметить, что введение такого простого генератора переменной частоты вызывает снижение требований, которые можно предъявить системе, благодаря чему последняя собственно перестает быть системой синхронной передачи в полном смысле этого слова, а скорее становится системой для регулирования числа оборотов бесколлекторных двигателей переменного тока (синхронных и асинхронных), системой, которая может

найти применение в устройствах для автоматического регулирования работы привода в широком смысле этого слова (управление корабельными рулями, привод винтов и т. п.).

Предложенная проф. М. П. Костенко схема состоит из вращаемого с неизменной скоростью первичным двигателем 2 генератора 1 (рис. 89), выполненного по типу трехфазной индукционной машины с кольцами. Ко вторичной цепи генератора 1 (статору или ротору) присоединена рабочая цепь с двигателями, в частности, с асинхронным двигателем 3. На одном валу с генератором 1 сидит коллекторный генератор-возбудитель 4, цепь статора которого присоединена к первичной цепи генератора 1 (например к кольцам его ротора). Для возбуждения коллекторного генератора-возбудителя (например со статора) служит какой-либо ключ-возбудитель (в данном случае на схеме рис. 89 он выполнен по типу синхронного генератора), приводимого во вращение с переменной скоростью при помощи серводвигателя 6 с широкой регулировкой скорости, осуществляемой реостатами в цепи возбуждения двигателя и в цепи якоря.

В случае отсутствия в месте расположения системы линии постоянного тока для возбуждения ключа 5 и питания двигателя 6 может быть применен специальный генератор постоянного тока 7, механически связанный с валом первичного двигателя 2. Изменением скорости вращения возбудителя-ключа 5 и силы тока его возбуждения реостатом 8 можно изменять по произвольно установленному закону частоту и напряжение на зажимах возбуждения коллекторного генератора 4, а тем самым частоту и напряжение на вторичных зажимах генератора 4, т. е. на зажимах (например на кольцах) первичной цепи главного генератора 1.

Для возможности регулирования частоты от нуля в случае подачи возбуждения на ротор необходимо, чтобы поле возбуждения генератора 1 вращалось против направления вращения его ротора. В случае же возбуждения генератора 1 со статора, наоборот, поле возбуждения должно вращаться согласно с ротором. Действительно, например, в первом случае при числе оборотов поля, синхронном с числом оборотов ротора, поле возбуждения окажется неподвижным в пространстве и не будет поэтому пересекать проводников обмотки статора (частота рабочей цепи равна нулю). В этот момент будет равно нулю и напряжение генератора 1 и, следовательно, управляемые двигатели (синхронные) не будут иметь какого-либо строго фиксированного положения, как это имело место при обтекании их постоянным током при питании непосредственно от коллекторного генератора. Очевидно, что для асинхронного двигателя обе схемы будут равноценны, так как наличие постоянного тока в обмотке его статора не дает ему какого-либо строго фиксированного положения (возбуждение на роторе отсутствует).

Таким образом, существенно отметить, что рассматриваемая схема не может дать какого-либо напряжения постоянного тока, потому что генератор 1 является бесколлекторной машиной, генерирование при помощи которой постоянного тока, как известно, невозможно. Поэтому без специальных (тормозных) устройств применение такой схемы возможно в синхронных передачах относительно малой точности. При уменьшении частоты возбуждения на роторе генератора поле начнет перемещаться в пространстве в сторону вращения ротора, и на зажимах генератора возникает э. д. с. $E_2 = k \cdot \Phi (f_0 - f_1)$, причем частота в рабочей цепи (на статоре главного

генератора) окажется равной $f_2 = f_0 - f_1$, где $f_0 = \frac{p_0 n_0}{60}$ — механическая частота вращения главного генератора (p_0 — число пар его полюсов; n_0 — число его оборотов). При возбуждении ротора постоянным током частота в рабочей цепи главного генератора окажется равной $f_2 = f_0$ (режим работы обычного синхронного генератора).

Для получения, например, на зажимах главного генератора зависимости $E_2 = f_2$, что должно иметь место при $M = \text{const}$ на валах питаемых двигателей, необходимо поддерживать значение потока постоянным, тогда $E_2 = k' (f_0 - f_1) = k' f_2$. Для получения же частоты f_2 на зажимах главного генератора, изменяющейся в пределах от 0 до f_0 , нужно, чтобы частота в первичной цепи менялась от f_0 до 0. Следовательно, э. д. с. E_1 в первичной цепи главного генератора для поддержания неизменного потока должна изменяться пропорционально частоте f_1 , меняющейся, например, в пределах от f_0 до 0. В данном случае соотношения между э. д. с. E_1 и E_2 будут такими же, как в коллекторном генераторе при возбуждении с ротора для случая постоянства напряжения на зажимах коллекторного генератора. Разница лишь та, что благодаря отсутствию коллектора и электрической связи между статором и ротором э. д. с. на зажимах рассматриваемого генератора будет представлять собой не суммарную э. д. с. статора и ротора, как в коллекторном генераторе, а лишь э. д. с. статора. Таким образом, при уменьшении э. д. с. E_2 (см. рис. 63) э. д. с. E_1 необходимо увеличивать для сохранения $\Phi = \text{const}$. Отсюда и коллекторный генератор 4 (рис. 89) должен работать в режиме, соответствующем $M = \text{const}$, что и следовало ожидать, так как главный генератор с электромагнитной точки зрения представляет собой трансформатор, который может быть заменен эквивалентной электрической схемой.

При $f_1 = 0$ машина представляет собой синхронный генератор. На ротор поступает только мощность возбуждения, обратная э. д. с. E_1 равна нулю. При увеличении частоты с порядком следования фаз в сторону, противоположную вращению ротора, между первичной и вторичной обмотками возникает трансформаторная связь, благодаря чему мощность в рабочую цепь будет передаваться не только за счет вращения (синхронный генератор), но и трансформаторно.

Следует заметить, что в коллекторном генераторе благодаря наличию компенсирующей обмотки цепь возбуждения доставляла лишь реактивную мощность возбуждения; в данном же случае возбудитель (коллекторный генератор) будет пропускать через себя и часть мощности, идущей в рабочую цепь или поступающей на вал возбудителя, как во всяком каскаде асинхронной машины с коллекторной. Эта часть от общей мощности P_2 будет пропорциональна частоте возбуждения f_1 . Последняя равна $f_1 = f_0 - f_2$. Если выразить величину f_1 как часть от f_0 (скольжение), то получим

$$s = \frac{f_0 - f_2}{f_0} = \frac{f_1}{f_0}.$$

Для нашего случая ($M = \text{const}$) $I_2 = \text{const}$, $E_2 = \kappa f_2$, следовательно, и $P_2 = f_2$ (см. рис. 90, где все величины со значками „2“ принадлежат рабочей цепи главного генератора, а со значками „1“ — первичной его цепи т. е. цепи возбуждения).

Часть мощности, передаваемой трансформаторно, будет пропорциональна величине sP_2 . Обозначим эту часть мощности через P_s .

Тогда:

$$P_s = sP_2,$$

но так как

$$P_2 \approx f_2,$$

то

$$P_s = kf_2 \left(1 - \frac{f}{f_0} \right).$$

На рис. 90 представлено изменение э. д. с. E_1 , E_2 , P_2 , P_s в зависимости от отношения $\frac{f_2}{f_0}$. Если за номинальную мощность главного генератора считать мощность, развиваемую им при $f_2 = f_0$, то расчетная мощность коллекторного генератора-возбудителя при частоте от $f_2 = 0$ до $f_2 = f_0$ будет равна 0,25 от мощности главного генератора.

При работе двигателя 3 с моментом на валу M , пропорциональным квадрату частоты и скорости, мощность коллекторного генератора будет равна 15% от мощности главного генератора, имеющей место при $f_2 = f_0$.

Изображенная на рис. 89 схема не позволяет получить значение $f_2 = f_0$ и более, благодаря тому что возбудитель коллекторного генератора выполнен по типу синхронной машины и, кроме того, генератор возбуждается со статора. Для получения в главной цепи $f_2 = f_0$ необходимо, чтобы на кольцо генера-

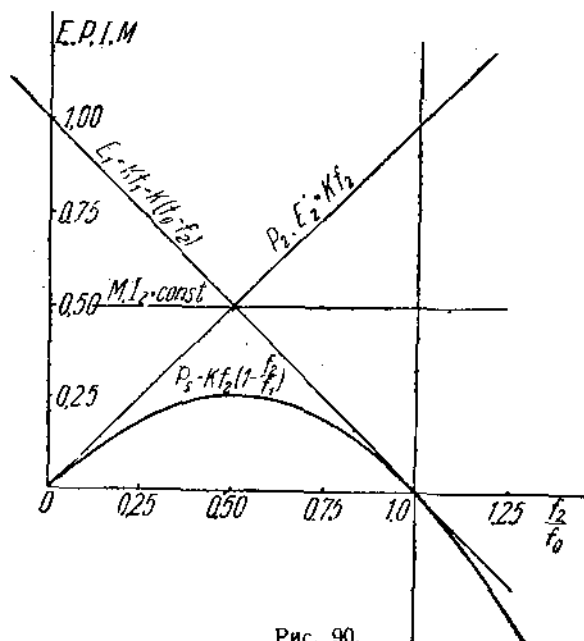


Рис. 90.

тора 1 был подан постоянный ток ($f_1 = 0$). Для этого в цепь возбуждения коллекторного генератора также нужно подать постоянный ток, которого от возбудителя 5 получить нельзя. Если нужно иметь $f_2 \geq f_0$, то следует или применить коллекторный возбудитель (по типу одноякорного преобразователя или генератора постоянного тока—см. § 30 и 39) или же выполнить коллекторный генератор с возбуждением с ротора. В последнем случае постоянный ток на зажимах коллекторного генератора 4 будет иметь место при частоте возбудителя 5, равной механической частоте вращения генератора 4 (режим одноякорного преобразователя). Если желательно сохранить возбуждение со статора и вместе с тем применить возбу-

датель по типу синхронного генератора при работе с частотой $f_1 = f_0$, то можно между коллекторным генератором 4 и возбудителем-ключом 5 вставить промежуточный возбудитель — коллекторный генератор 7 с возбуждением с ротора (схема с промежуточным возбудителем представлена на рис. 91).

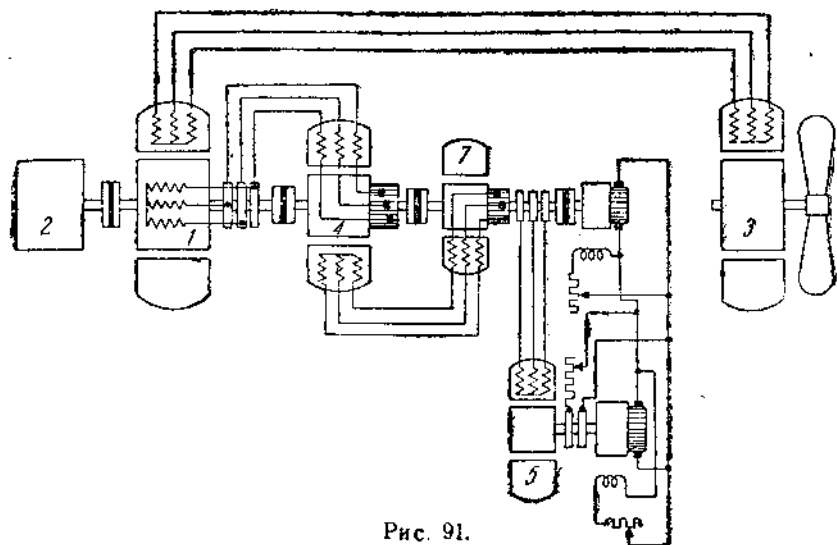


Рис. 91.

Схемы по рис. 89 и 91 могут найти применение в тех случаях, где требуется привод с регулированием скорости при питании от отдельной генераторной станции (в частности автоматическое управление приводом), например при работе двигателя с постоянным моментом в подъемных устройствах, при моменте на валу, пропорциональном квадрату скорости в вентиляторных установках и при электрическом приводе корабельных винтов, наконец, при постоянной мощности на валу двигателя в дизель-электровозах и т. п.

83. Схема фирмы Сименс-Шуккерт. Предложенная фирмой Сименс-Шуккерт схема для получения переменной частоты¹ также имеет в качестве главного генератора индукционную машину, но соединенную в каскад с преобразователем частоты (рис. 92).

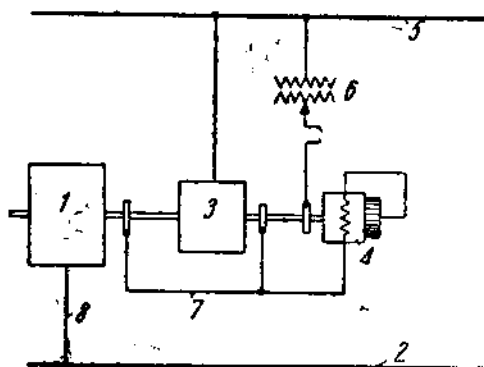


Рис. 92.

Указанная индукционная машина 1, питающая сеть 2 током переменной частоты, приводится во вращение асинхронным двигателем 3, соединенным, так же как и машина 1, в каскад с преобразователем частоты 4, сидящим

¹ Герм. патент № 500002 фирмы Сименс-Шуккерт, 1930.

качающегося якоря 9, воздействующего на тормозной диск, сидящий на валу каждого из управляемых двигателей. Эта схема является промежуточной схемой между схемами синхронной передачи с электромагнитной фиксацией положения валов двигателей при покое и схемами управления двигателями без какой-либо строгой фиксации этого положения при нулевой скорости валов. Благодаря пропорциональности между частотой и напряжением в рабочей цепи наиболее удачно работа схемы осуществляется при $M = \text{const}$, т. е. зависимости, которая чаще всего встречается в работе синхронной передачи.

ГЛАВА XV.

СИСТЕМЫ С МЕХАНИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДИФФЕРЕНЦИАЛАМИ.

85. Вводные замечания. Наличие коллекторного генератора и коллекторного ключа в ряде случаев не всегда может оказаться желательным и по экономическим причинам, а также и в эксплуатационном отношении, так как коллекторный генератор особенно рентабелен при достаточно больших мощностях, а питание двигателей непосредственно от ключа возможно лишь при малых мощностях.

Для синхронной передачи средней мощности иногда применяют системы переменной частоты с синхронными двигателями, связанными механическим дифференциалом.

Наличие механического дифференциала позволяет применять в качестве источника переменной частоты обычный синхронный генератор, вращаемый с переменной скоростью двигателем с широкой регулировкой числа оборотов.

86. Механический дифференциал. Механическое дифференциальное сцепление, изображенное схематически на рис. 94, состоит из двух пар конических шестерен 1, 2 и 3, 4. Шестерни 3, 4 могут свободно вращаться на оси 5, 10, укрепляемой на оси 6. Каждая из шестерен 1 и 2 находится в сцеплении с обеими шестернями 3, 4 и укреплена на пустотелой оси 7, могущей свободно вращаться на оси 6. Если одна из шестерен 1, 2, например шестерня 2, неподвижно закреплена, а другая приводится во вращение, то вращающаяся шестерня будет поворачивать шестерни 3, 4, которые покатыся по неподвижной шестерне, вращая ось 5, 10, а вместе с ней и ось 6. Если же обе шестерни 1 и 2 будут вращаться с одинаковой скоростью в противоположные стороны, то шестерни 3, 4 придут во вращение, однако ось 5—10 окажется стоящей неподвижно, так как качения шестерен 3, 4 по шестерням 1, 2 не будет. Очевидно, что при промежуточном положении, т. е. когда шестерни 1 и 2 вращаются с разными скоростями, перемещение оси 6 пропорционально алгебраической сумме перемещений указанных шестерен. Механический дифференциал обладает тем свойством, что передача от каждой из крайних шестерен 1 или 2 к обоим осям 5—10 средних шестерен 3, 4 равна двум в сторону замедления, независимо от соотношения числа зубцов колес 1 и 3. Следовательно, если шестерня 2 заstopорена, а шестерня 1 сделала один оборот, то она повернет шестерни

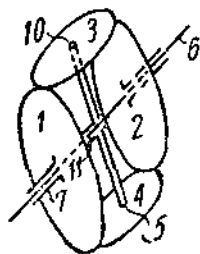


Рис. 94.

3, 4 и переместит точку 10 на расстояние, равное половине окружности, описанной радиусом 11—10, т. е. ось 5—10 повернется вместе с осью 6 на пол-оборота.

Представим себе шестерни 1 и 2 развернутыми в виде плоских линеек (1, 2 — рис. 95), относительно которых круг 3 катится без скольжения.

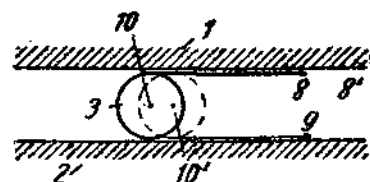


Рис. 95.

Последнее условие позволяет представить, что через круг — ролик 3 — перекинут гибкий шнур, один конец которого прикреплен к линейке 1 в точке 8, а другой — к линейке 2 в точке 9. Полученная система аналогична обычной блочной системе с углом обхвата в 180° , относительно которой известно, что при перемещении одного конца шнура на величину $8-8'$ при неподвижном конце 9 перемещение центра ролика $10-10'$ равно половине расстояния $8-8'$.

Отсюда нетрудно перейти к реальному дифференциалу, в котором установленное соотношение также будет иметь силу. Точно таким же образом из свойств блочной системы известно, что при одновременном перемещении точек 8 и 9 в разные стороны перемещение центра 10 блока равно алгебраической сумме перемещений точек 8 и 9. Это обстоятельство оказывается справедливым и для дифференциального зацепления, принцип работы которого мы свели к простой блочной системе.

87. Система с дифференциалом. Система состоит из двух источников переменного тока C и $C. Г.$ (рис. 96). Первый источник имеет неизменную частоту $f_1 = \text{const}$, второй же работает с меняющейся частотой (двигатель $Д$ с широкой регулировкой оборотов).

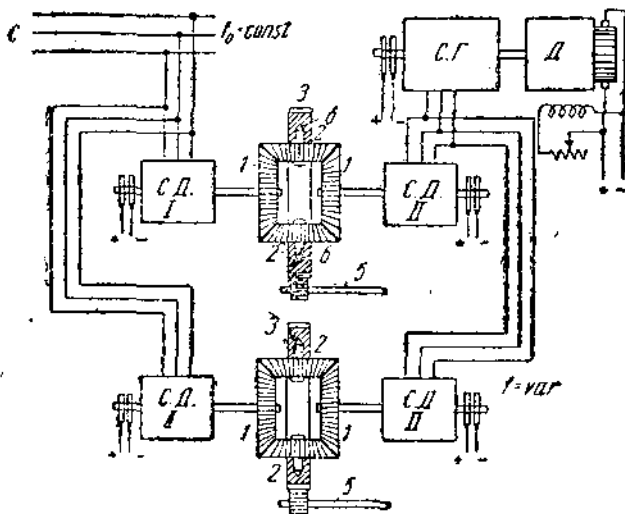


Рис. 96.

Каждый приемник состоит из двух синхронных двигателей $C. Д. I$ и $C. Д. II$, механически связанных между собой через дифференциал 1, 2, 3. Крайние шестерни 1, 1 последнего соединены с валами синхронных двигателей, а средние 2 свободно укреплены на внутренней поверхности большой шестерни 3, которая представлена в разрезе. Шестерня 3 сцеплена с шестерней рабочего вала 5.

При равенстве частот обоих источников переменного тока синхронные двигатели вращаются в разные стороны с одинаковой скоростью, благодаря чему шестерни 2 свободно вращаются на своих осях 6, а шестерня 5 вместе с рабочим валом остается неподвижной. Если частота f генератора

С. Г. меняется, то соответственно изменяется скорость двигателя *С. Д. II* и шестерня *Б* приходит во вращение с числом оборотов, равным разности чисел оборотов двигателей *С. Д. I.* и *С. Д. II*,

$$n = n_1 - n_{II} = \frac{(f_0 - f) 60}{p} \approx f_0 - f.$$

При $f_0 > f$ получим вращение шестерни *Б* в одну сторону, а при $f_0 < f$ — в другую. Таким образом, система легко позволяет производить реверсирование рабочего вала. В случае включения нескольких приемников (на схеме рис. 96 включены два приемника) будет иметь место синхронное перемещение соответствующего числа осей. Напряжение на зажимах вращающегося с переменной скоростью двигателя *С. Д. II* может быть изменено по любому закону в зависимости от режима работы двигателя (например $M = \text{const}$). Это достигается соответственной регулировкой величины тока в цепи возбуждения *С. Г.* при помощи реостата, управляемого, например, центробежным регулятором. В частности при $M = \text{const}$ на валу двигателей нужно изменять напряжение пропорционально частоте, для чего достаточно поддерживать постоянную силу тока в цепи возбуждения генератора *С. Г.*

88. Другие применения механического дифференциала в схемах с источниками переменной частоты. Механический дифференциал получил довольно широкое и разнообразное применение в схемах синхронной связи. Он применяется, например, для независимой установки угла, который затем отрабатывают приводные двигатели или серводвигатели передачи (следящий привод).¹

Как на пример подобной установки угла при помощи механического дифференциала

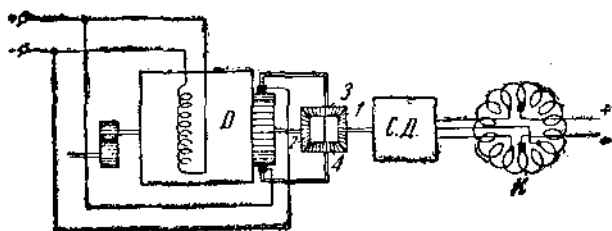


Рис. 97.

можно указать на схему с серводвигателем, изображенную на рис. 97. В схеме ключ-преобразователь постоянного тока в переменный *К* питает синхронный двигатель *С. Д.*, вал которого несет шестерню *1* механического дифференциала. Противоположная последней шестерня *2* сидит на валу серводвигателя *Д* постоянного тока с подвижными щетками, укрепленными на траверзе, которая в свою очередь скреплена с осью свободно на ней вращающихся средних шестерен *3, 4* дифференциала. Серводвигатель *Д* работает по принципу сдвига щеток из нейтрального положения, при котором двигатель находится в покое, причем по якору протекает ток короткого замыкания, так как обратной э. д. с. двигатель не имеет (может быть также применен коллекторный двигатель переменного тока).

Действие схемы таково. Для выполнения требуемого перемещения поворачивают на определенный угол рукоятку ключа *К*, вследствие чего на тот же угол или на угол пропорциональной ему поворачивается синхронный двигатель *С. Д.*, вращая шестерню *1*. Так как шестерня *2* заторможена рабочим моментом на валу серводвигателя, то шестерни *3, 4*, катясь по шестерне *2*, передвигают траверзу со щетками, отчего серводвигатель *Д*

3

¹ А. А. Солодовников, *Элементы телемеханики*, 1931 г., стр. 145 — 149.

приходит во вращение. Последний, начав вращаться при помощи шестерни 2, возвращает щеточную траверзу в исходное положение, отработывая заданный угол и автоматически останавливаясь (независимая установка угла). При непрерывном вращении ключа K двигатель придет в непрерывное вращение, следуя за перемещениями ключа K с отставанием на некоторый угол α , величина которого будет определяться величиной рабочего момента на валу двигателя (щетki должны быть настолько сдвинуты из нерабочего положения, чтобы обеспечить требуемый момент). На величине угла α сказывается также и скорость вращения щеток. Очевидно, что между валами двигателей и дифференциалом могут быть применены зубчатые передачи.

Система имеет, при своей простоте, ряд недостатков: 1) небольшая мощность благодаря наличию режима короткого замыкания в серводвигателе при положении покоя (тепловой баланс заставляет увеличивать размеры машины); 2) наличие значительного мертвого хода, понижающего точность передачи. Даже при холостом ходе приходится щетки поворачивать на некоторый мертвый угол, чтобы преодолеть силы трения; 3) инерция якоря двигателя, благодаря определенному маховому моменту, при возвращении щеток к нейтральному положению будет способствовать переходу щеток через него. Вследствие этого может возникнуть момент противоположного направления, что влечет за собой колебания якоря около среднего положения. Для уменьшения махового момента делают диаметр якоря серводвигателя как можно меньше и применяют успокоительную обмотку в случае двигателя постоянного тока.

В силу указанных недостатков большого распространения эта система не получила.

Очевидно, что для поворота шестерни 1 дифференциала следящего привода могут быть применены различные типы систем синхронной передачи, а не только схемы с источниками переменной частоты (например индукционные системы).

89. Механический дифференциал в схеме с коллекторным источником переменной частоты и синхронными двигателями. Механический дифференциал может быть применен в комбинации с синхронными двигателями для установки определенной скорости синхронного вращения ряда приемников, причем подобное вращение может продолжаться неопределенно долгое время до возвращения рычага дифференциала в исходное положение.

Подобная схема изображена на рис. 98.¹ В схеме применен коллекторный источник переменной частоты T с вращающимися щетками, выполненный по типу одноякорного преобразователя постоянного тока в переменный (см. § 37). Преобразователь T снабжен двумя комплектами щеток 4, 5 и 6, 7, 8. Первый комплект — неподвижный — служит для подведения постоянного тока, второй же комплект укреплен на вращающейся траверзе 32 и служит при вращении последней для снятия трехфазного переменного тока. Преобразователь T вращается как двигатель постоянного тока с неизменной скоростью. Траверза 32 через механический дифференциал 26, 27, 28, 29 связана с валом 33 вспомогательного синхронного двигателя R_1 . Ведомые синхронные двигатели $R_2, R_3, \dots$ так же, как и

¹ Герм. патент № 470805 по кл. 21с, 46 от 1929 г. на имя Cie des Forges et Aciéries de la Marine, Париж.

двигатель R_1 , питаются от щеток 6, 7, 8 через кольца 12, 13, 14. Крайнее коническое колесо 26 дифференциала связано с валом 33 двигателя R_1 , а противоположное колесо 27 — с траверзой 32. Средние колеса 28 и 29 свободно сидят на оси 30, которая может быть устанавливаема в различные положения в плоскости, перпендикулярной оси двигателя и преобразователя, при помощи рычага 31. Устройство работает следующим образом: при покое системы щетки 6, 7, 8 расположены на коллекторе 3 неподвижно, преобразователь T вращается с неизменной скоростью, а роторы двигателей $R_1, R_2...$ находятся в положении, соответствующем распределению постоянного потенциала на щетках 6, 7, 8, так как в обмотки якорей двигателя поступает постоянный ток, который и ориентирует роторы относительно поля возбуждения (на рис. 98 изображены синхронные двигатели с неподвижной магнитной системой и вращающимся якорем).

Если повернуть из исходного положения установочный рычаг 31 в некоторое другое, то соответственно вместе с ним повернутся шестерни 28, 29. Благодаря тому, что шестерня 26 имеет больший момент торможения, чем шестерня 27, шестерни 28, 29 будут катиться по первой и заставят повернуться последнюю, а вместе с ней и щетки 6, 7, 8. Распределение потенциала на этих щетках изменится, что заставит повернуться

роторы всех двигателей на тот же угол. Вместе с тем, вспомогательный двигатель R_1 , поворачиваясь благодаря указанному обстоятельству в новое положение, одновременно вращает шестерню 26, которая при неподвижно закрепленной оси 30 заставляет соответственным образом вращаться шестерню 27 и следовательно щетки 6, 7, 8. Новый сдвиг щеток вызывает продолжение движения всех двигателей, в том числе и двигателя R_1 , что обусловит дальнейшее движение щеток 6, 7, 8 по коллектору и т. д. Таким образом, первоначальный сдвиг по фазе, заданный поворотом ручки 31, будет поддерживаться неизменным при каждом новом положении роторов синхронных двигателей, т. е. последние придут, благодаря этому, в равномерное вращение со скоростью, соответствующей углу первоначального сдвига щеток. Максимальная скорость получается при сдвиге щеток на 90 электрических градусов (при этом имеет место максимальный момент у синхронного двигателя R_1). Для остановки двигателей надлежит

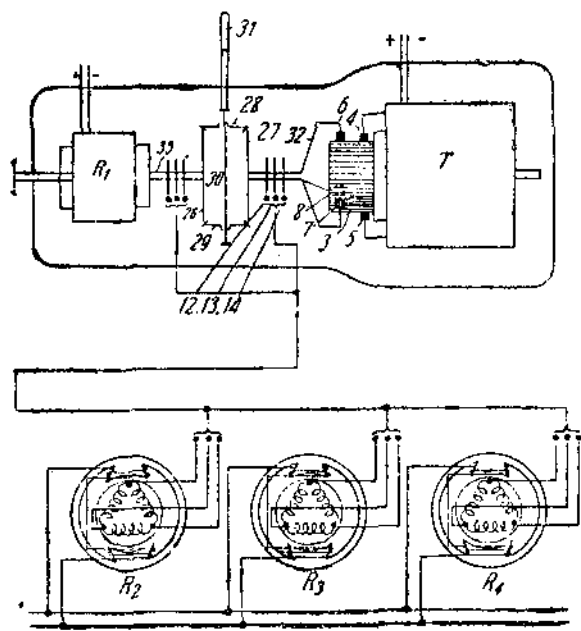


Рис. 98.

вернуть установочный рычаг в исходное положение. Тогда положения поля якоря двигателя R_1 и его магнитной системы совпадут в пространстве, и двигатель остановится. Одновременно с ним остановятся и управляемые синхронные двигатели.

Следует отметить, что направление вращения двигателей зависит от первоначальной установки щеток в ту или иную сторону от положения, соответствующего неподвижному состоянию двигателей.

Очевидно, что вместо преобразователя T может быть применен другой источник переменного тока с вращающимися щетками, например, по типу генератора постоянного тока или ключ Маругина и т. п.

Дифференциал может быть применен, как уже отмечалось, для независимой установки угла, причем на рис. 97 приведен пример управления при помощи синхронного двигателя серводвигателем, работающим со сдвигом щеток. Для независимой установки угла при помощи дифференциала в случае работы нескольких синхронных двигателей от одного командного поста с коллекторным преобразователем постоянного тока в переменный может быть применена схема, изображенная на рис. 99. В противоположность схеме на рис. 98, данная схема служит не для получения какой-либо синхронной скорости вращения нескольких осей, а для синхронного поворота управляемых двигателей на определенный угол, задаваемый в данном частном случае поворотом подзорной трубы 1.

Так же, как и в схеме по рис. 98 вспомогательный синхронный двигатель R_1 связан с валом щеточной траверзы 15 источника переменного тока T при помощи механического дифференциала 11, 13, 12, 14. Крайние шестерни 12, 14 последнего соответственно насажены на вал траверзы 12 и вал 9 двигателя.

Внутренние шестерни 11, 13 свободно укреплены на внутренней поверхности зубчатого колеса 10, подобно тому как это имеет место в схеме на рис. 96. Колесо 10 находится в зацеплении с подобным же колесом 4 с шестернями 5, 16 вспомогательного дифференциала 16, 5, 3, 6, шестерня 3 которого связана при помощи соответствующих передач с рукояткой 2 для поворота подзорной трубы 1. Противоположная шестерне 3 шестерня 6 соединена передачей 7, 8, 17, 18 с шестерней 19, сидящей на валу вспомогательного двигателя, получающего питание так же, как и все управляемые двигатели, от вращающихся щеток 15.

Действие устройства заключается в следующем. При установке подзорной трубы 1 при помощи рукоятки 2 вращается шестерня 3, которая заставляет катиться шестерни 5, 16 по неподвижной шестерне 6, что вызывает вращение зубчатого колеса 4, передвигающего в свою очередь колесо 10. Последнее заставляет катиться шестерни 11, 13 по неподвижной шестерне 14 и поворачивает тем самым шестерню 12, передвигая щетки 15 по коллектору. Благодаря сдвигу щеток приходят во вращение двигатели $R_1, R_2, R_3...$ Двигатель R_1 , вращаясь, через передачу 19, 18, 17, 8, 7, заставляет вращаться шестерню 6, которая поворачивает зубчатое колесо 4 и связанное с ним колесо 10 в исходное положение, совмещая тем самым в пространстве фазы щеток и роторов двигателей в новом положении покая, соответствующем новому положению подзорной трубы. Таким образом, передвигание последней на некоторый угол вызывает соответственное передвигание каких-либо управляемых органов, приводимых от синхронных двигателей.

90. Электрический дифференциал. Вместо механического дифференциала в ряде случаев может быть применен представляющий собой более изящное решение того же вопроса электрический дифференциал. Электрический дифференциал выполняется различно, в зависимости от его назначения, в частности может быть применена и индукционная машина, работающая за счет разности частот в статоре и роторе (аналогично механическому дифференциалу, в схеме на рис. 96; об этом см. далее); затем, электрический дифференциал может быть осуществлен с применением коллектора и вращающихся щеток (сдвиг фаз аналогично сохранению определенного угла сдвига между осями; рис. 97, 98, 99); наконец, электрическим дифференциалом называют электромеханические схемы, дающие алгебраическую сумму двух или нескольких независимых переменных, выражающихся угловыми поворотами соответствующих осей. Подобные схемы могут быть осуществлены по различным принципам (вольтметра, индукционного электродинамометра и др.).¹

В настоящем параграфе мы рассмотрим применение электрического дифференциала в схеме с меняющейся частотой и синхронными двигателями, представляющей собой вариант схемы на рис. 98 с механическим дифференциалом.

В случае применения электрического дифференциала источник переменной частоты T . Д. (рис. 100) имеет два коллектора 1 и 2 и работает в качестве однофазного преобразователя постоянного тока в переменный. На коллекторе 1 установлена подвижная траверза 3 с тремя щетками, могущими быть передвинутыми по коллектору при помощи рукоятки или принимающего синхронного двигателя 31, управляемого ключом T . Пере-

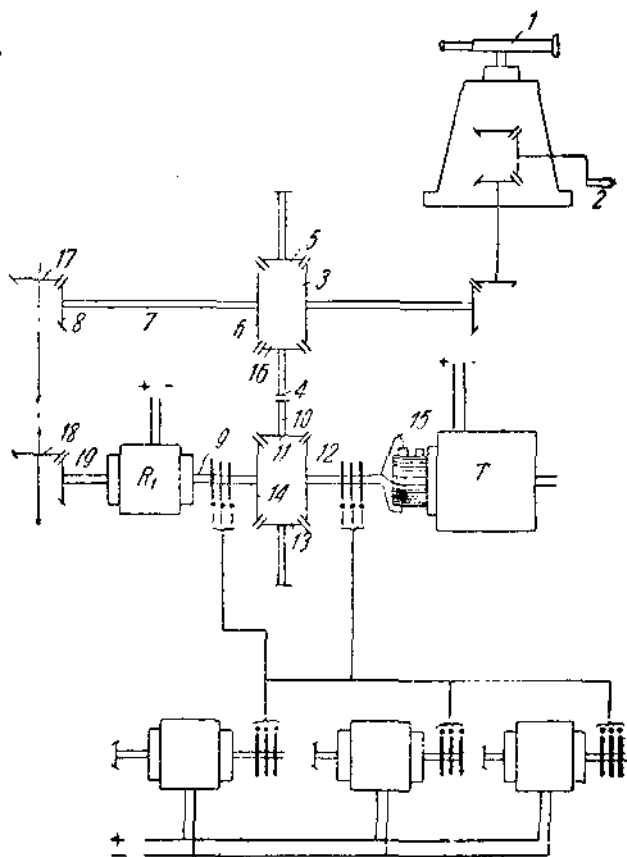


Рис. 99.

¹ А. А. Солодовников, Элементы телемеханики, 1931 г., стр. 150—156.

движение указанной траверзы со щетками по своему действию аналогично повороту установочного рычага 3/ в схеме с механическим дифференциалом по рис. 98.

На коллекторе 2 помещены два комплекта щеток 4 и 5, из которых комплект 4, состоящий из трех щеток, неподвижен и соединен с обмоткой статора, выполненной по типу трехфазной обмотки переменного тока. Второй комплект щеток 5, состоящий из двух или числа кратного двум (по числу полюсов) щеток, укреплен на вращающейся траверзе, жестко связанной с валом вспомогательного синхронного двигателя R_2 . Указанный комплект 5 соединен через кольца 6 с сетью постоянного тока и служит

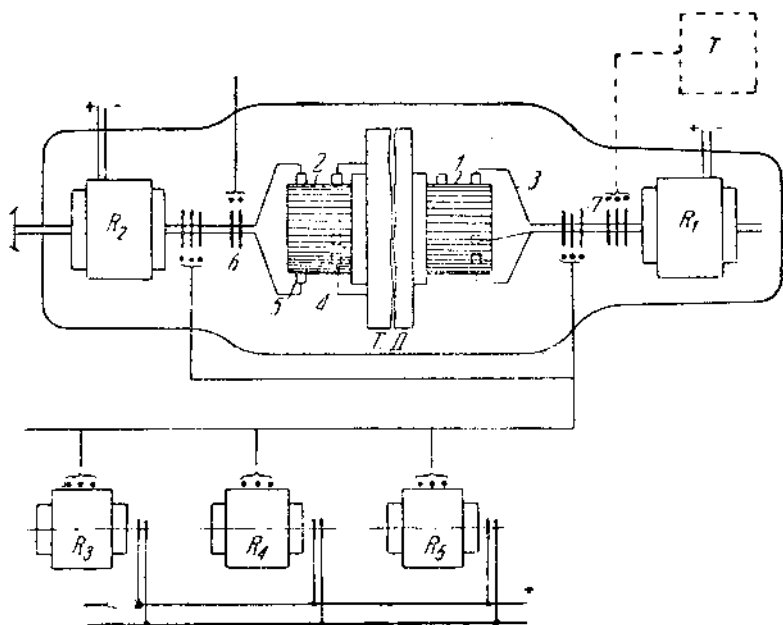


Рис. 100.

для питания преобразователя-дифференциала $T. Д.$ Управляемые двигатели R_3, R_4, R_5 , равно как и вспомогательный двигатель R_2 , питаются переменным током переменной частоты через кольца 7 от соединенного с ними комплекта щеток 3. Действие устройства по существу аналогично действию схемы по рис. 98.

При включении устройства в сеть постоянного тока преобразователь $T. Д.$ приходит во вращение с постоянной скоростью (двигатель постоянного тока, идущий вхолостую). Со щеток 3 снимается постоянный ток, который ориентирует роторы двигателей R_2, R_3 в определенном положении, зависящем от взаимного расположения щеток 5 и щеток 3. Если комплект щеток 3 повернуть на некоторый угол при помощи рукоятки или приемного двигателя R_1 , то распределение потенциала на них изменяется, благодаря чему все двигатели будут стремиться повернуть свои роторы в новое положение в пространстве, соответствующее новому распределению потенциала на щетках 3. Однако вспомогательный двигатель R_2 , поворачивая

по указанным обстоятельствам свой ротор, одновременно будет поворачивать щетки 5, меняя тем самым распределение потенциала на щетках 3 за счет смещения оси полюсов статора преобразователя. Таким образом между положением ротора двигателя в пространстве и распределением потенциала на щетках 3 будет поддерживаться установившимся сдвигом щеток 3 разность фаз, в силу чего двигатель R_2 (как и в схеме по рис. 98) придет в непрерывное вращение. Из предыдущего ясно, что при вращении щеток 5 на щетках 3 возникает трехфазное переменное напряжение, которое создаст в двигателях R_3 , R_4 , R_5 трехфазный переменный ток заставляющий последние следовать за вращением щеток 5. Скорость вращения щеток 5 и, следовательно, всей принимающей системы двигателей будет зависеть от угла сдвига щеток 3 из исходного положения (пределный угол сдвига — 90 электрических градусов). Направление вращения двигателей при неизменности их включения обуславливается направлением угла сдвига щеток 3. Двигатели будут находиться во вращении до тех пор, пока щетки 3 не будут повернуты в исходное положение, что заставляет роторы двигателей расположиться в пространстве соответственно распределению потенциала на указанных щетках. Можно также двигатели R_3 , R_4 , R_5 питать от неподвижных щеток 4, а вспомогательный двигатель R_2 — от щеток 3. Принцип действия устройства остается тот же самый. Однако в последнем случае имеет место то преимущество, что управляемые двигатели R_3 , R_4 , R_5 приходят во вращение после того, как пришел в действие вспомогательный двигатель R_2 . Действие устройства не изменится, если поменять ролями подвижные траверзы со щетками, а именно — щетки 5 приводить от двигателя R_1 (сдвигать на некоторый угол), а щетки 3 вращать от двигателя R_2 .

Для суммирования перемещений (например введения поправок при артиллерийской наводке) часто применяются коллекторные машины дифференциального типа. Последние выполняются, так же, как и машина по рис. 100, с трехфазным статором и тремя щетками на коллекторе и вращаются от первичного двигателя как генератор или же в качестве одноякорного преобразователя от сети постоянного тока. Статор подобной машины приключается к подвижным щеткам передатчика (например по типу генератора постоянного тока), а щетки на коллекторе — к управляемым двигателям или же к статору следующей дифференциальной машины (в цепь управления последовательно их может быть включено несколько, что зависит от числа вносимых поправок).

Таким образом, при повороте щеток передатчика смещается ось поля статора дифференциальной машины и следовательно происходит изменение потенциала на ее щетках и поворот управляемых двигателей. Для внесения поправок должно повернуть еще щетки дифференциалов, и тогда управляемые двигатели повернутся на алгебраическую сумму перемещений всех щеток (передатчика и дифференциалов).

Следует отметить, что в схеме по рис. 100 имеет место, так же как и в схемах с коллекторным генератором Костенко—Япольского или Шербиуса, вентильное управление приемными двигателями R_3 , R_4 , R_5 . Командным постом здесь является ключ T , который управляет синхронным двигателем R_1 , организующим далее работу синхронной схемы, питаемой от источника переменной частоты, составляющего вместе с двигателями R_1 и R_2 генераторную станцию. Вспомогательный двигатель R_2 может быть одновременно использован на станции в качестве контрольного двигателя для переме-

ния указателей, деталей сигнальных приборов и т. п. Подобному устройству присущи недостатки, характерные для преобразователей частоты с вращающимися щетками, а именно: малая загрузка меди благодаря плохим условиям коммутации, обусловленным наличием вращающихся щеток и, следовательно, отсутствием добавочных полюсов (см. § 37).

В. РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ.

ГЛАВА XVI.

ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РАБОТЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

91. Введение. В схемах синхронной связи с источниками переменной частоты на посту управления принимающими устройствами являются синхронные двигатели того или иного типа. Основным характерным отличием, объединяющим их, служит их работа от сети с переменной частотой, т. е. с переменным числом оборотов начиная от нуля.

Это обстоятельство резко отличает работу синхронного двигателя в обычных силовых установках с неизменной частотой от работы его в схемах синхронной связи, которая, с одной стороны, устраняет некоторые характерные особенности работы обычного синхронного двигателя, но, с другой стороны, выдвигает особые требования для получения нормальных режимов.

Прежде всего для работы синхронного двигателя в указанных схемах отпадают вопросы пуска и синхронизирования, а с ними и всякая пусковая и синхронизирующая аппаратура, так как двигатель начинает работать от частоты, равной нулю. Поэтому нормальным рабочим состоянием (одним из частных случаев) является положение двигателя при покое под напряжением, что возможно при частоте питающего тока, равной нулю. Все основные черты работы синхронного двигателя сохраняются в данном частном случае.

Наличие переменной частоты выдвигает требования соответствующего регулирования напряжения на зажимах двигателя в зависимости от изменения момента на валу двигателя в связи с изменением его скорости (об этом см. далее).

Наконец преимущественно имеющие место в схемах синхронной связи небольшие и средние мощности двигателей позволяют применять в указанных схемах такие конструкции двигателей, которые не могут быть применены в мощных установках (реактивные двигатели и др.). Вместе с тем, получающая за последние годы развитие синхронная передача большой мощности выдвигает требования применения синхронных двигателей обычного типа с соответствующими лишь расчетно-конструктивными видоизменениями, приспособляющими их к особенностям работы в схемах синхронной связи. Кроме того, особые конструкции некоторых источников переменной частоты обуславливают применение особых же конструкций синхронных двигателей и наоборот (двигатели Эриксона, двигатели Сперри и т. п.).

Таким образом, рассмотрение синхронных двигателей, применяемых в схемах синхронной связи, должно идти по следующим линиям:

1. Характерные черты синхронных двигателей, имеющие существенное значение при работе в схемах синхронной связи.

2. Разные типы двигателей, применяемые в этих схемах.

3. Особенности работы двигателей вообще в схемах синхронной связи при различных режимах (работа при меняющейся частоте) и частные особенности отдельных типов двигателей.

В отношении связи поля статора с ротором синхронного двигателя надлежит различать синхронные двигатели с эластичной связью поля статора с ротором, а следовательно, с осью, и двигатели с жесткой связью с ротором и осью.

Первый тип получил преимущественное распространение, так как он допускает значительно большие скорости работы (к этому типу принадлежат синхронные двигатели в обычном смысле этого слова с ротором, возбуждаемым постоянным или переменным током, или вовсе без возбуждения).

Второй тип работает на принципе электромагнитного двигателя с притяжением якоря к магниту-статору. Как известно, подобного рода двигатели вообще в промышленности имели некоторое распространение в конце прошлого столетия, а затем почти совсем были оставлены как технически и экономически менее рентабельные, чем ныне применяемые двигатели. Удержались указанные двигатели лишь в специальных областях (реле, часовые электрические механизмы и т. п.), где для привода не требуется большая мощность. В частности широкое распространение они получили до мировой войны в схемах синхронной передачи (двигатели Гейслера и Эриксона) в военных (морских и крепостных) установках. Благодаря инерции движущихся в них возвратно-поступательно частей скорость передачи движения в таких двигателях невелика и поэтому они не удовлетворяют одному из основных требований, предъявляемых к современной передаче, т. е. скорости (подробнее об этом см. далее). В силу указанных причин они вытесняются в настоящее время синхронными двигателями с эластичной связью с осью, допускающими большую скорость работы и развивающими большой вращающий момент.

92. Физическая картина работы синхронного двигателя в схемах синхронной связи. Наиболее просто работа синхронного двигателя условно может быть представлена на модели, изображенной на рис. 101. Модель состоит из двух магнитных систем с явно выраженными полюсами чередующейся полярности, могущих вращаться вокруг одной общей оси (внутренняя система находится на валу W , а наружная установлена, например, на роликах r и снабжена приводным ремнем R). Допустим первоначально, что никаких тормозящих явлений (трение в подшипниках, трение о воздух и т. д.) для внутренней системы не имеется. Тогда при покое внешней системы внутренняя система, будучи предоставлена самой себе, так расположится по отношению к внешней системе, что ее северные полюса придутся против южных последней и наоборот, причем оси полюсов будут совпадать, как это изображено на рис. 101 сплошными линиями. Такое положение соответствует идеальному случаю „работы“ синхронного двигателя в схеме синхронной связи при покое ротора, т. е. при возбуждении статора постоянным током (частота равна нулю), создающим в пространстве неподвижное магнитное поле,

условно представленное на рис. 101 в виде явно выраженных полюсов внешней магнитной системы. Это поле ориентирует относительно себя полюса ротора. Если при неподвижном поле статора, т. е. жестко закрепленной наружной системе шкив вала ротора (внутренней магнитной системы) нагрузить некоторым грузом Q , то внутренняя система сдвинется на некоторый угол θ в сторону действия груза Q , который создаст момент торможения от нагрузки на валу двигателя. Ротор в новом равновесном положении изображен на рис. 101 пунктиром. В этом положении момент торможения

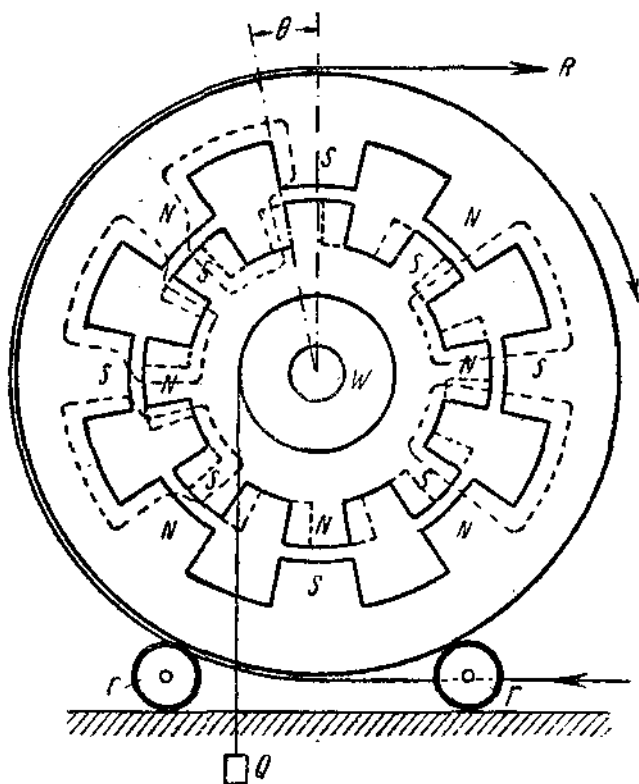


Рис. 101.

от действия груза Q будет уравновешен моментом, развиваемым двигателем за счет тяжения магнитных линий, проходящих из полюсов одной системы в противолежащие им полюса другой системы и наоборот.

На рис. 101 (правая половина) показано примерное расположение магнитных линий при совпадении осей полюсов обеих систем. На левой половине этого рисунка представлено расположение линий при сдвиге полюсов ротора относительно полюсов статора на угол θ благодаря действию груза на шкив ротора. Магнитные линии в последнем случае искривились и удлинились, благодаря чему при новом направлении силы магнитного притяжения

между полюсами возникла касательная составляющая, которая, создавая момент двигателя, уравнивает момент сопротивления на валу ротора. Таким образом, прежде всего следует констатировать, что и при покое ротора двигателя последний развивает момент, удерживающий ротор в неизменном положении, причем, чтобы вывести его из этого положения, необходима определенная сила, приложенная к валу. Второе чрезвычайно существенное обстоятельство для синхронной передачи заключается в том, что связь между полем статора и ротором не является жесткой, а наоборот — оказывается эластичной: с увеличением нагрузки угол сдвига осей θ увеличивается. Здесь можно провести аналогию с пружинной связью, т. е. эластичные магнитные линии подобны соединению двух колец (статора и ротора) при помощи пружины (или резиновых трубок), которая при пово-

рачивании одного кольца относительно другого растягивается, допуская некоторый сдвиг их, но, уравновесив своим натяжением усилие, приложенное к одному из колец, удерживает неподвижно последнее относительно первого. При повороте щеток или коллектора ключа-возбудителя на некоторый угол магнитное поле статора занимает в пространстве новое положение, строго соответствующее новому положению ключа-возбудителя. Ротор принимающего двигателя также повернется на этот же угол, но в пространстве не займет того же самого положения, а некоторое другое, которое будет отличаться от нового положения поля на угол θ . Следовательно, этот угол будет характеризовать собой степень точности передачи при данной нагрузке.

Если привести внешнюю магнитную систему во вращение, например, при помощи ремня R , то за ней начнет вращаться и внутренняя магнитная система (ротор) со сдвигом в пространстве на угол θ , зависящий от величины тормозящих усилий на валу этой системы. При пренебрежении трением в подшипниках, о воздух и т. п., угол θ будет иметь ту же величину, которую имел при неподвижном роторе. Мощность на валу двигателя, как известно, равна $P_M = M \omega$, где ω — угловая скорость ротора. При неподвижном роторе $\omega = 0$ и $P_M = 0$, в то время как M имеет примерно ту же величину, что и при вращении. Очевидно, что вращение внешней системы соответствует вращающемуся магнитному полю статора синхронного двигателя, причем мощность, развиваемая на валу двигателя, покрывается мощностью, поступающей из сети (в модели рис. 101 — мощностью, затрачиваемой на движение ремня).

В случае неявно выраженных полюсов на роторе будем иметь те же самые явления, так как здесь полюса определяются потоками, ориентированными относительно обмотки возбуждения на роторе, и поэтому вместо выступающих полюсов имеют место выходящие и входящие в ротор потоки, в силу чего ротор ориентируется относительно поля статора так же, как и в машине с явно выраженными полюсами.

Модель по рис. 101 может быть видоизменена следующим образом. Внутреннюю систему с явно выраженными полюсными выступами можно лишить возбуждения, т. е. выполнить из мягкого железа и без обмотки. Распределение магнитного потока статора (внешней системы) остается таким же, так как ротор под действием потока займет такое положение, что его выступы окажутся против полюсных выступов внешней системы, и для магнитных линий образуется путь наименьшего сопротивления. Если теперь приложить к ротору усилие, стремящееся повернуть выступы ротора относительно магнитного потока, то таким же образом, как и при возбужденном роторе, возникнет удлинение и искажение магнитных линий, которое обусловит касательную составляющую силы взаимодействия между полюсами статора и выступами ротора. Такая деформация магнитного потока статора при повороте ротора вызывается тем обстоятельством, что магнитные линии имеют тенденцию проходить по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, которым является путь из выступа статора к выступу ротора, и наоборот.

Таким образом, при вращении внешней системы, чему соответствует питание трехфазного статора переменным током, ротор будет следовать за указанной системой, причем его выступы будут так же, как и выше, сдвинуты на некоторый угол, соответствующий моменту торможения на валу двигателя, который будет работать как синхронный двигатель. Подобный

синхронный двигатель с выступами на роторе из мягкого железа и без обмотки возбуждения называется синхронным реактивным двигателем. Если выполнить ротор в виде круглого цилиндра из мягкого железа и без каких-либо выступов, то этот цилиндр в неподвижном поле статора будет занимать безразличное положение, так как для магнитных линий при любом положении ротора будет иметь место одинаковое магнитное сопротивление. Следовательно обязательным условием для возможности синхронной работы с ротором без возбуждения является наличие на последнем полюсных выступов, делающих ротор неодинаковым по его окружности в отношении магнитной проводимости. Очевидно, что если привести во вращение поле статора в двигателе с ротором в виде цилиндра из материала без большого гистерезиса, то ротор может притти во вращение лишь со скольжением (не со сдвигом) относительно поля статора, т. е. двигатель сможет работать только как асинхронный за счет индуктированных в теле ротора вторичных токов от перерезывания полем статора тела ротора.

Следует добавить, что если к валу ротора модели приложить момент от первичного двигателя в сторону, обратную действию груза Q , то ротор сдвинется в сторону опережения по отношению к оси поля статора. Будучи приведенным во вращение от постороннего двигателя, ротор начнет как бы увлекать за собой поле статора, т. е. внешняя магнитная система придет во вращение и будет отдавать через ремень R энергию, представляющую в этом случае электрическую нагрузку генератора, тогда как при демонстрации режима двигателя, наоборот, привод системы от ремня представлял собой электрическую энергию, поступающую в двигатель из сети. В случае применения ротора без возбуждения, но с выступами (реактивная машина) также возможен генераторный режим. В модели на рис. 101 ротор без возбуждения, будучи приведен во вращение, заставит вращаться за собой и наружную систему, благодаря тяжению магнитных линий, упруго связывающих выступы обеих систем. Очевидно, что в случае реактивной машины генераторный режим возможен лишь при параллельной работе реактивной машины с сетью, необходимой для намагничивания магнитной системы генератора (аналогично асинхронному генератору).

93. Кривые вращающих и статических моментов синхронных двигателей. Выше уже было отмечено, что при нагрузке вала синхронного двигателя тормозящим моментом ротор двигателя смещается в сто-

рону действия этого момента на некоторый угол θ и уравнивает тем самым приложенную на вал нагрузку. При увеличении последней угол θ соответственно увеличивается и т. д. Подобная связь имеет место вне зависимости от того, с какой скоростью вращается синхронный двигатель, т. е. переменным током какой частоты питается двигатель. В частности, зависимость моментов, развиваемых двигателем при различных нагрузках и частоте

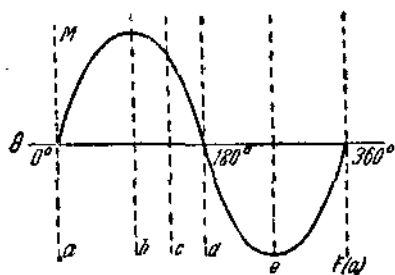


Рис. 102.

питающего тока, равной нулю, от величины угла θ называется кривой статических моментов. Эта же кривая при вращении двигателя (т. е. $f \neq 0$) носит название кривой вращающих моментов. Следовательно, статический момент есть частный случай вращающего момента, а именно момент,

развиваемый двигателем при скорости ротора, равной нулю. Таким образом вращающий момент двигателя возрастает с увеличением угла θ , причем максимум момента получается при значении угла θ , равном около 90 электрических градусов (для синхронного двигателя с возбуждением на роторе). При дальнейшем увеличении угла θ вращающий момент убывает и становится равным нулю при $\theta = 180^\circ$. Изменение вращающего момента при синусоидальном распределении потока происходит приблизительно по кривой, близкой к синусоиде (рис. 102). На рис. 103 даны отдельные моменты взаимного расположения полюсов статора и ротора при различных тормозящих моментах для двигателя с возбуждением на роторе (магнитные системы даны в развернутом виде). Значения вращающего момента, развиваемого двигателем, в функции от угла θ для приведенных положений ротора относительно поля статора даны на рис. 102 (а, б, с и т. д.). Так, для $\theta = 90^\circ$ (положение б) имеем максимальное значение момента. С дальнейшим увеличением угла θ , т. е. увеличением величины тормозящего момента, вращающий момент убывает (положение с). Из рис. 103 (а, б, с) видно, что растянутые грузом Q магнитные линии стремятся совместить полюса N_1 и S_1 , N_2 и S_2 и т. д., причем значение вращающего момента до значения $\theta = 90^\circ$ растет с увеличением момента торможения. Далее равновесие нарушается, при увеличении момента торможения сверх его значения, соответствующего $\theta = 90^\circ$, двигатель выпадает из синхронизма, так как момент вращения с увеличением угла θ начинает все уменьшаться. При $\theta = 180^\circ$ момент вращения оказывается равным нулю, так как одноименные полюса статора и ротора расположатся друг против друга (положение д). В этом положении, так же как и в положении а,

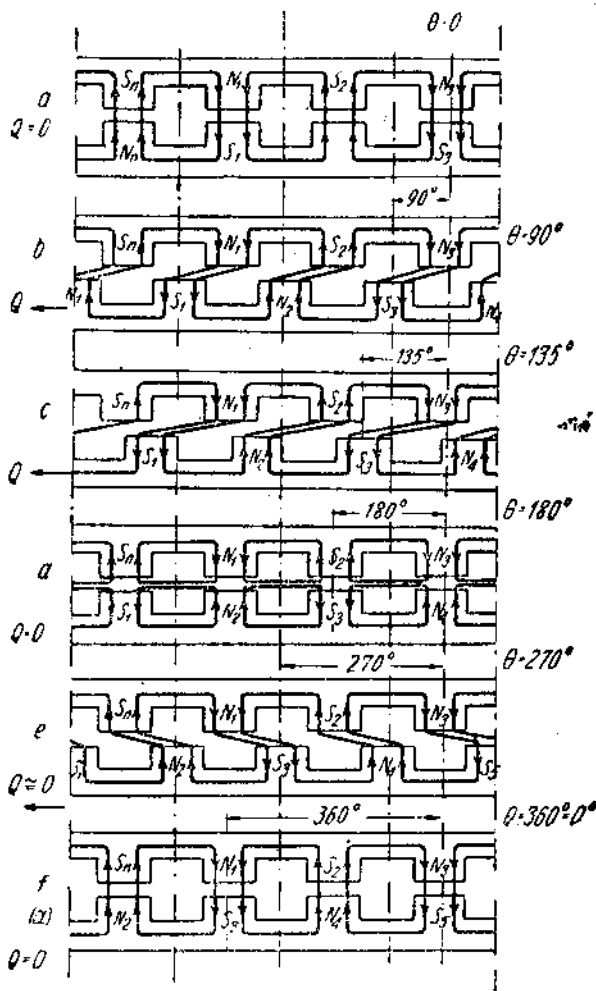


Рис. 103.

момента до значения $\theta = 90^\circ$ растет с увеличением момента торможения. Далее равновесие нарушается, при увеличении момента торможения сверх его значения, соответствующего $\theta = 90^\circ$, двигатель выпадает из синхронизма, так как момент вращения с увеличением угла θ начинает все уменьшаться. При $\theta = 180^\circ$ момент вращения оказывается равным нулю, так как одноименные полюса статора и ротора расположатся друг против друга (положение д). В этом положении, так же как и в положении а,

между полюсами статора и ротора будет иметь место взаимодействие лишь в радиальном направлении (в случае а полюса будут притягиваться, в случае же d — отталкиваться). Усилий по касательной со стороны поля статора ротор испытывать не будет. Если ротор привести в положение b или c и затем сбросить нагрузку, то он вернется в положение a (подобие упругой деформации пружины, резины и т. п.). Положение d является неустойчивым, потому что ротор из него может быть легко выведен небольшой нагрузкой, причем ротор начнет поворачиваться в сторону действия нагрузки. Практически положение d можно получить в двигателе при питании его обмотки статора постоянным током. Тогда можно, нагрузив вал настолько, чтобы двигатель выпал из синхронизма (при неподвижном в пространстве поле), привести ротор в положение d и сбросить нагрузку. Если же последнюю не сбрасывать, то ротор, перейдя положение d, окажется в положении e. Последнее положение не является устойчивым, так как направление вращающего момента здесь меняется и оказывается направленным в сторону действия нагрузки (рис. 103, e). В картине по рис. 103, с магнитные линии, стремясь сократиться, тянут ротор слева направо по чертежу. В картине же по рис. 103, e магнитные линии, наоборот, тянут ротор справа налево, т. е. в сторону действия нагрузки. Из положения e (неустойчивое положение) ротор переходит в положение f, аналогичное исходному положению a. Если на валу в этот момент имеется некоторая нагрузка (меньшая максимального вращающего момента), то ротор займет промежуточное положение между положениями a и b; при отсутствии же нагрузки будет иметь место положение f. Переход к последнему от положения a осуществляется путем передвигания ротора относительно поля статора на 360° (на рис. 103, a против полюса N_1 приходится полюс S_1 , на рис. 103, f против того же полюса N_1 оказался полюс S_2).

Приведенные картины справедливы вне зависимости от того, вращается ли поле статора (питание переменным током) или неподвижно (питание обмотки статора постоянным током). Из всего приведенного выше явствует, что ротор будет находиться в синхронизме с ведущей системой лишь при нагрузке, вызывающей сдвигание ротора до 90° электрических градусов. Следовательно, работа двигателя оказывается устойчивой лишь при углах θ , заключающихся в пределах между 0 и 90° . Остальная часть кривой моментов является неустойчивой. При выпадении из синхронизма ротор при благоприятных условиях может занять новое устойчивое положение, отличающееся от первого на 360° электрических градусов (при двухполюсной системе на целый оборот).

Тормозящий момент нагрузки, равный максимальному вращающему моменту, имеющему место при $\theta \approx 90^\circ$, называется опрокидывающим моментом, так как этот момент выводит двигатель из синхронизма. Следует несколько остановиться на физической картине переходного положения ротора. Из этого неустойчивого положения могут быть получены неустойчивые же положения c и e в зависимости от того, в какую сторону сообщить валу ротора усилие извне. Картина перехода от одного из двух крайних положений c или e в положение d подобна картине распределения магнитных линий, имеющей место при пересечении проводниками магнитных линий (гипотеза акад. В. Ф. Миткевича).¹ При растягивании магнитных линий (рис. 103, c) средние части замкнутой магнитной линии, имеющие одинаковый

¹ В. Ф. Миткевич, Физические основы электротехники. 1932; стр. 44.

магнитный потенциал, соприкасаются, благодаря чему из одной растянутой магнитной линии, например линии $S_1N_1S_2N_2$, образуется две замкнутых магнитных линии S_1N_2 и N_1S_2 . Теперь, при толчке ротора в ту или иную сторону, может произойти соответственное соединение двух магнитных линий в одну. Так, если приложить усилие слева направо, то мы опять получим ту же замкнутую линию из двух, например $S_1N_1S_2N_2$, если же усилие приложено справа налево, то в соединение придут другие линии, а именно: например, линия N_1S_2 соединится уже не с линией S_1N_2 , а с линией S_3N_4 , благодаря чему на роторе возникнет касательное усилие, противоположное по направлению усилию, возникающему при повороте ротора слева направо. Таким образом при сдвигании ротора в ту или иную сторону из положения d возникнет взаимодействие, направленное по касательной в сторону сдвига.

Допустим, что ротор слегка сдвинут справа налево. Тогда возникшее касательное усилие будет продолжать этот сдвиг и переместит полюса ротора на 180 электрических градусов, приведя его в положение f , причем изменение вращающего момента будет происходить по правой части кривой вращающих моментов, приведенной на рис. 102. При сдвиге ротора в противоположную сторону из положения d магнитные линии будут продолжать этот сдвиг и приведут ротор в положение a . Изменение вращающего момента двигателя будет происходить по левой части кривой на рис. 102. Если сообщенное ротору усилие при сдвигании ротора из положения d останется приложенным при переходе ротора к положению a , то ротор перейдет это положение и остановится тогда, когда его вращающий момент уравнивает приложенное усилие на вал ротора. Здесь можно констатировать весьма важное для синхронной передачи обстоятельство. Полное совпадение осей поля статора и полюсов ротора возможно лишь при нулевом тормозящем моменте на валу двигателя и отсутствии какого-либо трения и т. п. Следовательно, при совпадении осей полюсов статора и ротора двигатель развивает нулевой вращающий момент. Поэтому в положении покоя ротор синхронного двигателя при толчках подвержен колебаниям около среднего своего положения благодаря эластичной связи его вала с полем статора, т. е. с командным постом (ключом). Это обстоятельство является недостатком всех систем, имеющих эластичную связь вала с полем статора.

В нормальных синхронных двигателях в силовых установках нормальное значение момента обычно должно быть значительно меньше опрокидывающего момента, что делается в целях обеспечения устойчивости работы и предохранения от выпадения из синхронизма при внезапных толчках, перегрузках и т. д. Поэтому угол θ в указанных двигателях для нормальной нагрузки берется редко более 20 электрических градусов. В схеме синхронной связи весьма существенную роль играет точность передачи, величина которой зависит от величины угла θ . Поэтому с точки зрения точности передачи углы θ не могут быть значительными. Обычно в схемах синхронной связи значения угла θ для синхронных двигателей колеблются в пределах $2 \div 7$ электрических градусов, что при чаще всего встречающихся четырехполюсных системах дает $1 \div 3,5$ пространственных градусов. Если форма кривой вращающего момента в нормальных синхронных двигателях не играет очень существенной роли, то для двигателей в схемах синхронной связи она представляет собой фактор, в значительной мере определяющий расчет и конструкцию синхронного двигателя. Очевидно, что наи-

более благоприятной формой кривой вращающих моментов является кривая, круто поднимающаяся от начала координат. Тогда малым углам θ будут соответствовать значительные вращающие моменты, и степень точности передачи повысится.

На рис. 104 представлены рабочие части различных кривых вращающих моментов синхронных двигателей в зависимости от угла θ . Из этих кривых видно, что при одном и том же вращающем моменте M_H (нормальное значение момента) у различных типов двигателей углы оказываются различными, причем очевидно, что наибольшей степенью точности будет обладать двигатель с кривой 1. Если работа двигателя осуществляется с реверсированием, что обычно имеет место, то степень точности опре-

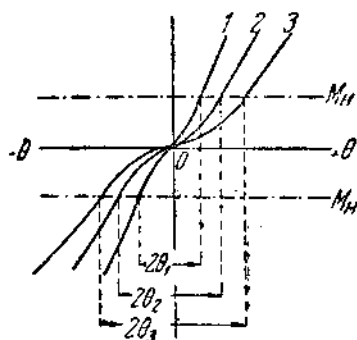


Рис. 104.

деляется двойным углом θ , так как при реверсировании двигатель будет стоять на месте до тех пор, пока ключ не перейдет положение совпадения осей полюсов статора и ротора (один угол θ) и затем не передвинется на угол θ в другую сторону для преодоления момента торможения на валу двигателя. Характер кривой вращающих моментов зависит от распределения индукции на полюсном делении и от формы полюсного наконечника. В конечном итоге крутизна кривой определяется интенсивностью изменения магнитной проводимости для магнитного потока при изменении угла θ . Чем сильнее меняется указанная проводимость, тем

круче идет кривая вращающего момента. При синусоидальном распределении индукции и синусоидальном изменении проводимости (нормальный синхронный двигатель) получаем синусоидальное изменение вращающего момента (рис. 102). В реактивных двигателях для увеличения крутизны кривой вращающего момента выполняют полюсные выступы с острыми (следовательно насыщенными) краями (об этом подробнее см. далее).

94. Практическое определение кривой вращающих моментов.

Уже отмечалось, что кривая вращающих моментов (характер ее) в основном не меняется от скорости вращения двигателя, т. е. частоты питающего тока. Поэтому для получения характера кривой вращающих моментов достаточно снять кривую статических моментов, т. е. при возбуждении обмотки статора постоянным током. Разница между кривыми вращающих и статических моментов заключается в том, что в последнем случае скажется влияние зубцов, тогда как в первом случае будут иметь место некоторые средние значения моментов. Абсолютные значения вращающих моментов при одном и том же угле θ и разных частотах на статоре будут зависеть от характера регулирования напряжения на зажимах двигателя при изменении частоты. Если это регулирование таково, что будут удовлетворены условия нормальной работы двигателя, а именно:

$$\frac{E_2'}{E_2''} = \frac{f_2'}{f_2''} \sqrt{\frac{M'}{M''}},$$

то кривая вращающих моментов и в абсолютных значениях своих ординат может быть примерно неизменна для различных частот питающего двигателя тока (об условиях нормальной работы двигателей см. далее).

Если же при всех значениях частоты напряжение на зажимах двигателя останется неизменным, то, как будет разобрано далее, опрокидывающий момент с увеличением частоты будет снижаться.

Для снятия кривой статических моментов обмотку статора двигателя питают постоянным током (с распределением по типу трехфазного тока), отчего ротор определенным образом ориентируется относительно статора (исходное положение). К шкиву, находящемуся на валу двигателя (рис. 105), прикладывают различные усилия (например вешают различные грузы, производят натяжение пружины и т. п.), в силу чего ротор смещается на соответствующий угол θ , величину которого при каждом значении усилия на шкиве отмечают на циферблате, по которому движется стрелка, скрепленная с валом ротора. Тогда построенная кривая зависимости значений QR от угла θ и будет представлять кривую статических моментов, которая является основной характеристикой при испытании синхронного двигателя, работающего в схеме синхронной связи, так как она обуславливает предельное значение нагрузочного момента при заданной статической точности передачи.

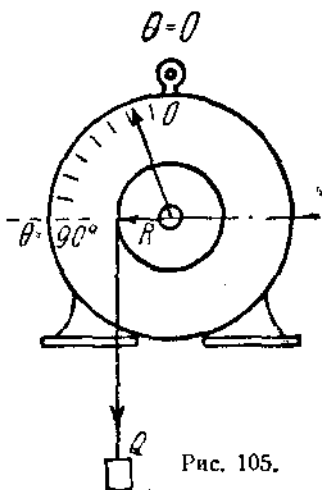


Рис. 105.

Для определения кривой вращающих моментов в функции угла θ при вращении двигателя существует ряд методов, большинство которых основано на применении стробоскопических устройств.¹

95. Общее выражение для вращающего момента. Вращающий момент любой электрической машины представляет собой результат взаимодействия ампервитков статора AW_S и ампервитков ротора AW_R . Поэтому в наиболее простом случае при синусоидальном распределении ампервитков и индукции по окружности статора вращающий момент M можно выразить как векторное произведение ампервитков AW_S и магнитного потока Φ_R , создаваемого ампервитками AW_R :

$$M = AW_S \cdot \Phi_R \sin (AW_S \cdot \Phi_R).$$

Очевидно, что этому выражению эквивалентно выражение при обратном соотношении:

$$M = AW_R \cdot \Phi_S \sin (AW_R \cdot \Phi_S).$$

Углы $(AW_S \Phi_R)$ и $(AW_R \Phi_S)$ определяются приложенным к валу двигателя моментом. Можно также выразить вращающий момент через результирующий поток Φ :

$$M = AW_S \cdot \Phi \sin (AW_S \cdot \Phi) = AW_R \cdot \Phi \sin (AW_R \cdot \Phi).$$

¹ См., например, книгу Л. М. Пиотровского и В. К. Попова, Испытание машин переменного тока, вып. I, 1927 г., стр. 100—104, а также G. Gillion, *Mesure de l'angle de déplacement de l'inducteur d'un alternateur ou d'un moteur synchrone*, RGE, octobre 1933, № 15.

Ранее уже указывалось, что поток возбуждения может создаваться не только обмоткой возбуждения, но и обмоткой якоря (недовозбужденный синхронный двигатель). При уменьшении ампервитков обмотки возбуждения увеличиваются ампервитки возбуждения якоря так, чтобы результирующий поток возбуждения оставался примерно неизменным. В пределе обмотка возбуждения может быть совсем выключена и тогда все ампервитки возбуждения будут подаваться обмоткой якоря (реактивный двигатель).

Надлежит отметить, что при изменении ампервитков обмотки возбуждения максимальный момент двигателя будет меняться, благодаря чему с этой точки зрения не безразлично, какой обмоткой будут доставляться ампервитки возбуждения.

Выше было отмечено, что для возникновения момента в двигателе необходимо наличие двух систем ампервитков (AW_S и AW_R). В частности наличие этого условия необходимо и при неподвижном роторе, т. е. при питании статора постоянным током.

В этом случае двигатель развивает соответствующий нагрузке момент на своем валу, но полезная мощность его равна нулю.

Для получения полезной мощности необходимо вращение двигателя, что может иметь место при выполнении второго условия для действия электрической машины — наличия „коммутации“, т. е. совокупности средств, обеспечивающих непрерывность вращения ротора. В трехфазном синхронном двигателе коммутация осуществляется переключением максимума тока в отдельных фазах трехфазной обмотки якоря при посредстве коллектора-переключателя (см. § 18—20) или питанием указанной обмотки трехфазным током, создающим вращающееся магнитное поле. В двигателе постоянного тока коммутация осуществляется при помощи коллектора.

Отмеченные два условия лежат в основе работы каждого двигателя, причем в схемах синхронной связи коммутацию, а, следовательно, и вращение двигателя задает коммутатор-ключ на командном посту. Следует отметить, что специфические особенности работы синхронного двигателя в схемах синхронной связи делают особенно выпуклыми и физически ощутимыми эти два основных условия работы всякой электрической машины.

ГЛАВА XVII

СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ, ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ.

§6. Работа синхронного двигателя с возбуждением постоянным током. Предположим, что синхронный двигатель работает от сети с неизменной частотой в режиме идеального холостого хода, т. е. без затраты какой-либо энергии на вращение ротора. Если возбуждение двигателя таково, что обратная э. д. с. E целиком уравнивает приложенное напряжение, то в статоре в случае идеального холостого хода тока не будет, причем векторная диаграмма двигателя имеет вид, представленный на рис. 106, а. При изменении тока возбуждения, например, в сторону уменьшения за счет разности $\Delta E = \dot{U} - \dot{E}$, возникнет уравнивающий, преимущественно чисто реактивный ток $I_R \approx \frac{\Delta E}{x_a}$, так как реактивное сопротивление синхронного двигателя обычно значительно больше активного. На рис. 106, б изображена векторная диаграмма для этого последнего случая (активным сопротивлением обмотки

статора пренебрегается). Ток I_R обмотки статора создает вращающееся магнитное поле, оси полюсов которого совпадают с осями полюсов ротора. Поле, создаваемое статором, в случае $E < U$ усиливает поле ротора (подмагничивает), в случае же $E > U$ — размагничивает поле ротора. Двигатель попрежнему не развивает никакого вращающего момента (как уже отмечалось, при совпадении осей полюсов статора и ротора имеет место нулевой вращающий момент).

Если вал двигателя нагрузить каким-либо тормозящим моментом, то ротор двигателя сдвинется в сторону, противоположную вращению, на угол θ . Благодаря этому фаза обратной э. д. с. по отношению к прежнему своему значению (была противоположна приложенному напряжению) также сдвинется в сторону запаздывания на угол θ . Векторная диаграмма для этого случая представлена на рис. 106, с. За счет разности фаз э. д. с. E и приложенного напряжения возникнет разность напряжений $\Delta e'$, дающая почти чисто активный ток I_a (см. также рис. 106, d), взаимодействующий с полем ротора и сообщающий вращающийся момент валу ротора, уравновешивающий приложенный тормозящий момент. Таким образом теперь из сети поступает и активный ток (вернее, активная составляющая результирующего тока двигателя), полученный за счет сдвига ротора и, следовательно, э. д. с.

E по фазе на угол θ , и реактивный ток (реактивная составляющая результирующего тока двигателя), полученный за счет разности амплитуд напряжения U и э. д. с. E . Соответствующую полученному режиму работы векторную диаграмму (рис. 106, с) можно разложить на две составляющие ее диаграммы — диаграмму с реактивным током (рис. 106, b) и диаграмму с активным током, т. е. со сдвигом на угол θ э. д. с. (рис. 106, d) (здесь э. д. с. $E = U'$). Последняя диаграмма получается из диаграммы на рис. 106, а путем поворота вектора E на угол θ , причем величина этого вектора (так же, как и вектора приложенного напряжения U') берется равной значению его на рис. 106, б.

Из диаграммы на рис. 106, с видно, что полная разность напряжений ΔE имеет две составляющих: одну — Δe (за счет разности амплитуд величин U и E) и вторую — $\Delta e'$ (за счет разности фаз величин U' и E).

Следовательно, уменьшение величины возбуждения, отвечающей равенству $U = E$ вызывает, с одной стороны, уравнительный реактивный ток, а с другой — приводит к уменьшению при том же угле θ величины $\Delta e'$ (разности напряжений за счет разности фаз E и U). Можно сказать и таким образом: уменьшение E в отношении $\Delta e'$ как бы понижает напряжение на зажимах двигателя с величины U до величины U' , равной уменьшенному значению E , а это обстоятельство не может не сказаться на значении опрокидывающего момента двигателя, которое уменьшается с уменьшением величины E . Это

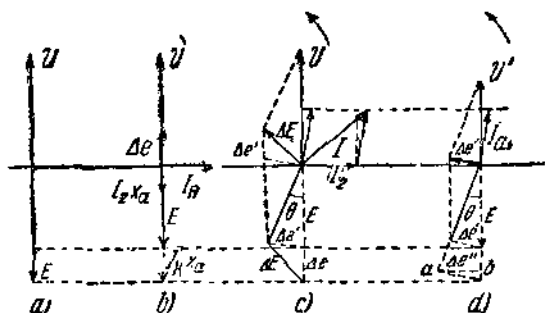


Рис. 106.

видно и из сопоставления величины $\Delta e'$ и $\Delta e''$, полученных при различных значениях обратной э. д. с. Так, для получения одного и того же вращающего момента в обоих случаях нужен один и тот же активный ток, т. е. одна и та же величина Δe . Поэтому в случае большей величины E ротор для того же момента будет сдвинут на меньший угол θ , при равных же углах θ получаются различные Δe , а следовательно, и различные вращающие моменты. Наличие в общем случае (рис. 106, с) двух токов — активного и реактивного — позволяет, как известно, и магнитное поле статора представить состоящим из двух составляющих полей — во-первых, поля, ось которого совпадает с осью полюсов ротора (продольное намагничивающее или размагничивающее поле) и, во-вторых, поля, сдвинутого своей осью на 90° от оси полюсов ротора (поперечное поле).

Величина ампервитков поперечного поля жестко связана с вращающим моментом на валу и задается нагрузкой, величина же продольного поля может быть изменяема током возбуждения. В частности, (ответствующим регулированием она для данного режима нагрузки может быть сведена к нулю (реакция якоря будет выражаться лишь в виде поперечного поля). Следует отметить также, что в последнем случае все необходимые ампервитки возбуждения для машины при данном приложенном напряжении и частоте подаются обмоткой возбуждения на роторе, и в статор двигателя поступает чисто активный ток. Если возбуждение уменьшено, то для получения тех же самых ампервитков возбуждения (количество их определяется размерами и материалом магнитной цепи двигателя, приложенным напряжением и частотой) в добавление к ампервиткам возбуждения ротора из сети должны поступить намагничивающие ампервитки (двигатель является для сети индукционной нагрузкой). Наоборот, в случае увеличения возбуждения против исходного его значения требуется поступление из сети ампервитков, уменьшающих чрезмерное количество ампервитков возбуждения, подаваемых с ротора, до нужной величины. Следовательно, из сети поступит емкостный ток, действующий размагничивающим образом (двигатель является для сети емкостной нагрузкой). Учет активного сопротивления ротора, а также потерь на трение и др. при холостом ходе двигателя вносит некоторые изменения в диаграмму рис. 106, а именно при холостом ходе будет иметь место небольшой угол θ , при $E \neq U$ (рис. 106, б); уравнивающий ток будет иметь активную составляющую и т. д. Однако указанные дополнения совершенно не меняют принципиальной сущности работы синхронного двигателя, разобранный выше.

97. Выражения для мощности синхронного двигателя с неявновыраженными полюсами. Первоначально мы будем исходить из предположения неизменности реакции якоря, что справедливо для машины с неявновыраженными полюсами. (Разницей в магнитном насыщении в отдельных частях магнитной системы машины пренебрегаем.) Для машины же с явновыраженными полюсами проводимость для продольного и поперечного потоков реакции якоря различна, что вызывает за один оборот машины изменение полного реактивного сопротивления машины ($x_a = x_s + x_R$). Однако в первом приближении, как известно, и для машины с явновыраженными полюсами можно считать $x_a = \text{const}$ и пользоваться диаграммой Бен-Эшенбурга (Behn-Eschenburg), приведенной для двигателя на рис. 107. Для выражения мощности, потребляемой двигателем из сети, можем написать:

$$P_1 = mU \cdot I \cos \varphi.$$

Электромагнитная мощность (мощность, передаваемая статором ротору, имеет значения $P_a = mEI \cos \psi$ (см. рис. 107). Мощность P_a равна мощности P_1 , уменьшенной на величину потерь в меди статора $P_{Cu} = m I^2 r_a$:

$$P_a = P_1 - P_{Cu} = m U I \cos \varphi - m I^2 r_a. \quad (60)$$

Электромагнитная мощность P_a превращается в механическую работу. Последняя расходуется за вычетом потерь в железе P_{Fe} и механических потерь P_m на полезную работу на валу двигателя.

Полезная мощность двигателя равна:

$$P = P_a - P_{Fe} - P_m.$$

Величины мощностей P_1 и P_a можно выразить через основные величины синхронного двигателя U ; E ; θ ; z_a (полное сопротивление двигателя); ψ_k (угол в треугольнике короткого замыкания двигателя).

Обратимся к диаграмме на рис. 107. Проведем через точку C прямую KL под углом φ к прямой CA так, что угол $KCA = \varphi$. Можем написать, что проекции всех сторон треугольника OAC на линию KL равны

$$I z_a \cos \varphi = U \cos \angle A Q K + E \cos \angle O C K.$$

Отметим, что $\angle B A C = \psi_k$.

Тогда $\angle O C K = \pi + \psi - \psi_k - \theta$ — $\varphi = \pi - \psi_k - \theta$, угол же

$$\begin{aligned} \angle A Q K &= \pi - \angle O C K - \angle A Q C = \\ &= \angle O Q C = \pi - \angle O C K - \\ &\quad - \angle S O Q = \end{aligned}$$

$$= \pi - (\pi - \psi_k - \theta) - \theta = \psi_k.$$

Следовательно,

$$\cos \angle O C K = -\cos (\psi_k + \theta) \text{ и } \cos \angle A Q K = \cos \psi_k.$$

Подставляя найденные значения в написанное выше выражение, получим:

$$I z_a \cos \varphi = U \cos \psi_k - E \cos (\psi_k + \theta),$$

$$\text{откуда } I \cos \varphi = \frac{U}{z_a} \cos \psi_k - \frac{E}{z_a} \cos (\psi_k + \theta).$$

Умножая обе части полученного равенства на величину mU , получим окончательно для мощности P_1 :

$$P_1 = m U I \cos \varphi = m \frac{U}{z_a} [U \cos \psi_k - E \cos (\psi_k + \theta)]. \quad (61)$$

Если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора, то угол ψ_k станет равным 90° (вообще же он в машинах средней и большой мощности близок к 90°), и выражение для P_1 упростится:

$$P_1 = m \cdot \frac{U}{x_a} E \sin \theta. \quad (62)$$

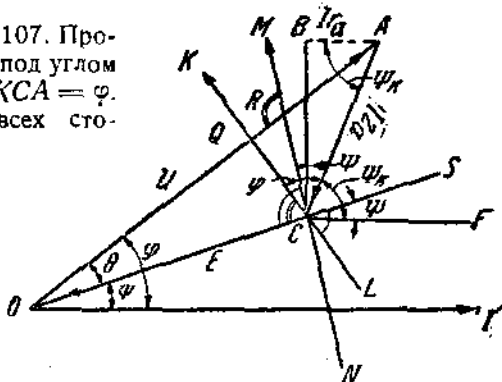


Рис. 107.

Таким образом оказывается, что мощность двигателя при неизменности U и E пропорциональна $\sin \theta$, т. е. зависит от сдвига ротора на угол θ .

$$P_1 \equiv \sin \theta.$$

Сопоставив полученное выражение с общим выражением для P_1 , получим:

$$m UI \cos \varphi = m \cdot U \frac{E \sin \theta}{x_a} \text{ и } I \cos \varphi = \frac{E \sin \theta}{x_a}. \quad (63)$$

Величина $E \sin \theta$ (рис. 106 *d*) представляет собой ту составляющую (ab) разности напряжений $\Delta e''$, которая создает активную составляющую тока двигателя ($I \cos \varphi$). При пренебрежении активным сопротивлением r_a эта составляющая оказывается перпендикулярна вектору U .

В случае двигателя малой мощности, что как раз весьма часто встречается в схемах синхронной связи, пренебрежение активным сопротивлением r_a вносит большую неточность и потому в этом случае надлежит пользоваться полным выражением для P_1 .

Для определения электрической мощности P_a проведем через точку C прямую MN под углом ψ к прямой AC . Далее, как и выше при выводе выражения для P_1 , проектируем стороны треугольника OAC на линию MN . Тогда можем написать:

$$I z_a \cos \psi = E \cos \angle OCM + U \cos \angle ARM.$$

Устанавливаем, что

$$\angle OCM = \pi + \psi - \psi_k - \psi = \pi - \psi_k;$$

$$\angle ARM = \angle ORC = \pi - \theta - \angle OCM = \pi - \theta - \pi + \psi_k = \psi_k - \theta.$$

Следовательно

$$\cos \angle OCM = -\cos \psi_k \text{ и } \cos \angle ARM = \cos (\psi_k - \theta).$$

Подставляя найденные значения в написанное выше соотношение сторон треугольника OAC , получим:

$$I z_a \cos \psi = -E \cos \psi_k + U \cos (\psi_k - \theta).$$

Умножая обе части на mE и несколько преобразуя, окончательно получим

$$P_a = m E I \cos \psi = m \frac{E}{z_a} [U \cos (\psi_k - \theta) - E \cos \psi_k]. \quad (64)$$

Если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора, то получим следующее упрощенное выражение для P_a (угол $\psi_k = 90^\circ$):

$$P_a = m E \frac{U \sin \theta}{x_a}. \quad (65)$$

Как и следовало ожидать, электромагнитная мощность P_a при постоянстве U и E пропорциональна $\sin \theta$.

Сопоставляя это выражение с общим выражением для P_a , можем написать

$$I \cos \psi = \frac{U \sin \theta}{x_a}. \quad (66)$$

Величина $U \sin \theta$ (рис. 106, *d*) представляет собой ту составляющую разности напряжений $\Delta e'$, которая создает составляющую тока двигателя, сдвинутую относительно обратной э. д. с. E на угол 180° ($1 \cos \psi$).

Вектор $U \sin \theta$ перпендикулярен вектору э. д. с. E и поэтому при $r_a = 0$ создает указанную составляющую тока.

Приведенные выражения для P_a и P_1 справедливы для двигателя с неявновыраженными полюсами на роторе. Однако они с достаточной степенью точности в ряде случаев могут быть применены и для двигателя с явновыраженными полюсами.

98. Вращающий момент синхронного двигателя с неявновыраженными полюсами. Вращающий момент синхронного двигателя также может быть выражен через угол θ и основные величины двигателя. Электромагнитная мощность P_a , передаваемая со статора на ротор, сообщает последнему момент, равный в общем виде:

$$M_a = \frac{P_a}{\omega}, \quad (67)$$

где

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60}$$

угловая скорость вращения ротора.

Подставляя значение P_a и ω , будем иметь:

$$M_a = \frac{P_a}{\omega} = \frac{60 P_a}{2 \pi n} = \frac{30 m E I \cos \psi}{\pi n}. \quad (68)$$

Этот момент уравнивает ряд тормозящих моментов, а именно: M_{Fe} — момент от потерь в железе, M_m — момент от механических потерь (трение в подшипниках, трение о воздух и др.); M_n^t — момент от нагрузки на валу. Полезный вращающий момент двигателя $M = M_n$.

Приведенное выражение вращающего момента M_a (он носит название момента в синхронных ваттах) может быть переведено в размерность в килограммометрах:

$$M_a = \frac{30}{9,81 \pi \cdot n} m E I \cos \psi = 0,974 \frac{m}{n} E I \cos \psi = 0,974 \frac{P_a}{n}. \quad (69)$$

В синхронных двигателях, работающих от сети с неизменной частотой, момент M_a будет прямо пропорционален мощности P_a . В схемах же синхронной связи при меняющейся частоте будут соответственно меняться и обороты, в силу чего для поддержания значения момента $M_a = \text{const}$ (наиболее часто встречающийся случай) мощность P_a должна изменяться пропорционально числу оборотов. Если желательно сохранить примерно неизменный угол (неизменную точность передачи), то должно поддерживать $I \cos \psi = \text{const}$. Отсюда для выполнения условия $P_a \equiv n$ нужно, чтобы напряжение на зажимах $U = n$.

Выражение (68) можно написать иначе, подставив вместо E его значение

$$E = 4,44 k_w f w \Phi \cdot 10^{-8},$$

$$M_a = \frac{2}{\pi \cdot 10^{-8}} \cdot 1,11 \cdot m k_w p w \Phi I \cos \psi = c \Phi I \cos \psi. \quad (70)$$

Последнее выражение представляет собой общую форму выражения для момента любого электрического двигателя.

Выразим величину момента M_a в зависимости от угла θ . Для этого подставим значение P_a из выражения (64) в выражение для момента M_a (69).

$$M_a = 0,974 \frac{m}{n} \frac{E}{z_a} [U \cos (\psi_k - \theta) - E \cos \psi_k] \quad (71)$$

или при $r_a \approx 0$ и $\psi_k = 90^\circ$

$$M_a = 0,974 \cdot \frac{m}{n} E \frac{U \sin \theta}{x_a}. \quad (72)$$

Определим теперь значение угла θ , при котором наступает максимум вращающего момента M_a , равный опрокидывающему моменту двигателя.

Для этого возьмем первую производную от выражения для M_a по углу θ и приравняем ее нулю.

$$\frac{dM_a}{d\theta} = c \cdot m \frac{E}{z_a} [-U \sin (\psi_k - \theta)] = 0 \quad (73)$$

или

$$\sin (\psi_k - \theta) = 0,$$

отсюда

$$\psi_k - \theta = 0,$$

или

$$\theta = \psi_k.$$

При $r_a = 0$ будем иметь $\theta = 90^\circ$, т. е. максимальный вращающий момент наступает при угле θ , равном 90° , что было уже отмечено выше. В небольших двигателях $M_{\max}$ наступает при $\theta < 90^\circ$, так как в них активное сопротивление обмотки статора довольно значительно по сравнению с x_a . Теперь можем определить максимальное значение момента:

$$M_{a \max} = c \cdot m \frac{E}{z_a} [U - E \cos \psi_k]$$

или, полагая $\psi_k = 90^\circ$, имеем приблизительно

$$M_{a \max} = \frac{0,974}{n} \cdot m \frac{E \cdot U}{z_a} \text{ кгм.} \quad (73)$$

Установим влияние возбуждения двигателя на $M_{a \max}$. Найдем значение E , при котором имеет место наибольшее значение $M_{a \max}$, для чего возьмем первую производную от полного выражения для $M_{a \max}$.

Это выражение дает максимум при

$$E = \frac{U}{2 \cos \varphi_k},$$

благодаря чему

$$M_{a \max (\max)} = c \frac{U}{2 z_a \cos \psi_k} \cdot \left(U - \frac{U}{r} \right) = c \frac{U^2}{4 r_a}, \quad (75)$$

так как $z_a \cos \psi = r_a$.

Из последнего выражения вытекает, что максимум опрокидывающего момента не зависит от реактивного сопротивления якоря и что он обратно пропорционален активному сопротивлению якоря.

Приведенные выше выражения для вращающего момента синхронного двигателя справедливы лишь для случая работы его от сети с частотой,

отличной от нуля, так как они получены путем деления электромагнитной мощности P_a на угловую скорость.

В случае $f=0$, т. е. при питании обмотки статора синхронного двигателя постоянным током (исходное положение в системе синхронной связи) мощность на валу двигателя равна нулю и поэтому выражение для статического момента надлежит определять исходя из электромагнитной энергии, запасенной в магнитной системе двигателя, и общего выражения для момента последнего (§ 95).

Электромагнитную энергию, запасенную в магнитной системе, можно, как известно, представить так:

$$A = \frac{1}{8\pi} \int_0^\Phi H d\Phi.$$

Здесь H — напряжение магнитного поля, а Φ — поток.

Выразим величины H и Φ через ампервитки системы:

$$\begin{aligned} M &= 0,4 \pi A W; \\ \Phi &= 0,4 \pi A W \cdot \lambda, \end{aligned}$$

где $A W = A W_a + A W_m$ ($A W_a$ — ампервитки, создаваемые якорем, а $A W_m$ — обмоткой возбуждения); λ — проводимость для магнитного потока.

Положим, что изменение потока ($I = \text{const}$) при повороте ротора происходит по синусоиде $\Phi = 0,4 \pi A W \lambda \cos \theta$ и что $A W_a = A W_m$. Тогда, зная, что момент M двигателя равен

$$M = \frac{dA}{d\theta}$$

и подставляя в выражение для A значения H и Φ , получим:

$$M = \frac{1}{24,65} \left[\frac{0,4 \pi (A W_a + A W_m)}{1000} \right]^2 \cdot \lambda \sin \theta \text{ кгм.}$$

В случае неравенства $A W_a$ и $A W_m$ в выражение для A подставляют лишь переменную часть потока, представляющую собой разность $\Phi = \Phi_{\max} - \Phi_{\min}$, причем величины $\Phi_{\max}$ и $\Phi_{\min}$ соответствуют положениям ротора при $\theta = 0$ и $\theta = 180^\circ$.

При равномерном воздушном зазоре (двигатель с неявновыраженными полюсами) величину λ , пренебрегая сопротивлением железа, можно приближенно определить следующим образом:

$$\lambda = \frac{Q}{1,6 \delta},$$

где δ — величина воздушного зазора, а Q — сечение полюса.

99. Синхронизирующая мощность и синхронизирующий момент синхронного двигателя. На рис. 102 представлена кривая изменения вращающего момента в зависимости от угла θ . Было установлено, что максимум момента наступает при значении угла θ , близком 90° . Однако

при этом моменте двигатель работать не сможет, так как такой момент является опрокидывающим моментом для двигателя и небольшое добавочное увеличение нагрузки выведет последний из синхронизма. Таким образом в этом случае положение двигателя не является устойчивым, ибо ротор его не удерживается в синхронизме никакой силой. Наоборот, при моменте на валу, равном нулю, ротор находится в устойчивом положении и различные случайные толчки не выводят его из синхронизма, а заставляют лишь колебаться около среднего положения. Следовательно, можно сказать, что ротор при нулевом моменте на его валу удерживается в синхронизме значительной „синхронизирующей силой“. Работу синхронного двигателя должно характеризовать не только с точки зрения величины развиваемого им момента, но также и с точки зрения устойчивости работы синхронного двигателя при данном угле θ . Указанная устойчивость работы для данного положения ротора характеризуется синхронизирующим моментом и синхронизирующей мощностью.

При вращающем моменте, равном нулю ($\theta = 0$), синхронизирующий момент равен максимуму. Наоборот, при $\theta = 90^\circ$ вращающий момент максимален, а синхронизирующий равен нулю. Математически под синхронизирующим моментом следует понимать производную от вращающего момента по углу θ . Следовательно, синхронизирующий момент характеризует собой интенсивность нарастания вращающего момента с изменением угла θ , причем степень этой интенсивности свидетельствует о степени устойчивости двигателя в синхронизме при данном угле θ .

Соответственно синхронизирующая мощность характеризует интенсивность изменения электромагнитной мощности P_a с изменением угла θ и представляет собой производную от синхронной (электромагнитной) мощности по углу θ .

Если взять приближенное выражение для P_a

$$P_a = m E \frac{U \sin \theta}{x_a},$$

то для синхронизирующей мощности получим

$$P_S = \frac{dP_a}{d\theta} = m E \frac{U \cos \theta}{x_a}, \quad (76)$$

т. е. если P_a изменяется по синусоиде, то P_S изменяется по косинусоиде.

На фиг. 108 изображена кривая изменения мощностей P_a и P_S (правая часть рисунка для режима двигателя, а левая для режима генератора). При $\theta = 0$ $P_a = 0$, а $P_S = \text{тах}$, причем значение P_S положительно (синхронизирующая мощность удерживает двигатель в синхронизме). Если момент прикладывается к валу с направлением против направления вращения поля статора, машина работает двигателем (P_a двигателя возрастает), причем синхронизирующая мощность удерживает двигатель в синхронизме до значения угла $\theta = \frac{\pi}{2}$, после чего знак мощности P_S меняется, и она способствует выпадению двигателя из синхронизма (сравни с картиной распределения магнитных потоков на фиг. 103). Если же момент приложен по направлению вращения ротора и поля статора, машина работает генератором. Мощность P_a меняет свой знак, так как теперь электромагнитная (синхронная) мощность передается с ротора на статор. Синхронизирующая

мощность P_S остается положительной (т. е. удерживающей машину в синхронизме) до значения угла $\theta = 90^\circ$, после чего она способствует выпадению машины из синхронизма. Из сравнения выражений для мощностей P_a и P_S видно, что максимальная синхронизирующая мощность равна максимальной электромагнитной (синхронной) мощности, что следует из самой природы обеих мощностей, так как связь между ними по существу такая же, как между потенциальной и кинетической энергией.

Если обратиться к полному выражению мощности P_a (64) и, пользуясь им, определить синхронизирующую мощность P_S , то получим

$$P_S = -\frac{dP_a}{d\theta} = m \frac{EU}{z_a} \sin(\psi_k \pm \theta), \quad (77)$$

где знак плюс относится к генераторному режиму, а знак минус — к режиму двигателя. Отсюда вытекает, что для режима генератора синхрони-

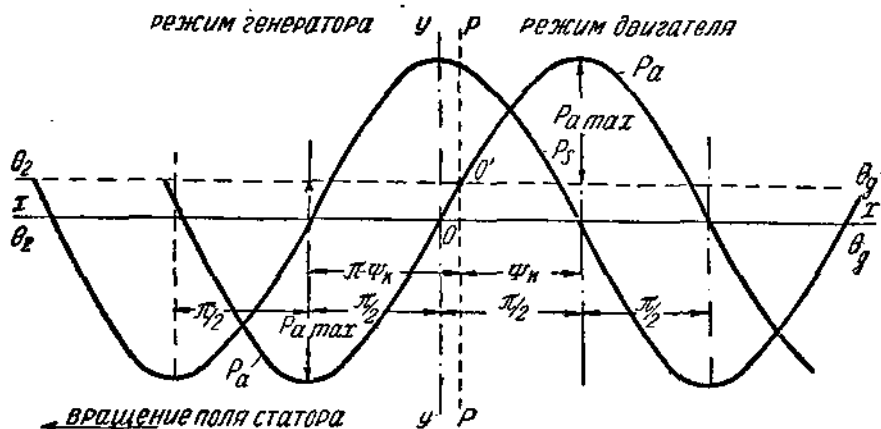


Рис. 108.

зирующая мощность максимальна не при $\theta = 0$, а при $\theta = \frac{\pi}{2} - \psi_k$ (близком к нулю), т. е. кривая P_S на рис. 108 должна быть сдвинута относительно начала координат на угол $\rho = \theta = \frac{\pi}{2} - \psi_k$ (на рис. 108 передвинута ось ординат — пунктир). Соответственно сдвигается и кривая мощности P_a , причем максимум мощности $P_{a \max}$ для генератора наступает при $\theta = \pi - \psi_k > \frac{\pi}{2}$, а для двигателя — при $\theta = \psi_k < \frac{\pi}{2}$ [это непосредственно вытекает из рассмотрения выражения для максимального момента двигателя (см. § 98), который, как было установлено, имеет место при $\theta = \psi_k$]. Нетрудно доказать, что для генератора максимальная электромагнитная мощность немного больше, чем для двигателя, а именно на величину $2m \frac{E^2}{z_a} \cos \psi_k$. (Эта разница определяется наличием активного сопротивления r_a обмотки статора.) Благодаря этому в точной диаграмме ось абсцисс расположится выше оси симметрии на величину $m \frac{E^2}{z_a} \cos \psi_k$ (на рис. 108 указана пунктиром). Таким образом начало координат переместится из положения O в положение O' . Приведенная точная диаграмма существенна для

двигателей небольшой мощности (в частности для схем синхронной связи), у которых r_a велико и угол ψ_k заметно отличается от 90° .

Таким же образом может быть определен и синхронизирующий момент. Пользуясь приближенной формулой момента M_a (72), получим:

$$M_S = 0,974 \frac{\pi}{n} E \frac{U \cos \theta}{x_a}. \quad (78)$$

Если же исходить из полного выражения для вращающего момента, то будем иметь:

$$M_S = \frac{dM_a}{d\theta} = \frac{30 m}{\pi n} \cdot \frac{E \cdot U}{z_a} \cdot \sin(\psi_k \pm \theta), \quad (79)$$

где знак плюс относится к работе машины генератором, а знак минус — к работе ее двигателем.

Очевидно, что кривые моментов M_a и M_S будут повторять кривые мощностей P_a и P_S .

100. Диаграмма напряжения синхронного двигателя с явно выраженными полюсами. В случае двигателя с явно выраженными полюсами, как уже отмечалось, имеет место непостоянная по величине реакция якоря благодаря тому, что сопротивление поперечному и продольному магнитным потокам ее оказывается неодинаковым. Первый имеет максимум тогда, когда данная катушка располагается своими сторонами под серединой полюсов ротора, что заставляет поток замыкаться преимущественно через воздух. Максимум продольного потока наступает при совпадении осей полюса ротора и катушки статора, в силу чего продольный поток замыкается преимущественно по железу.

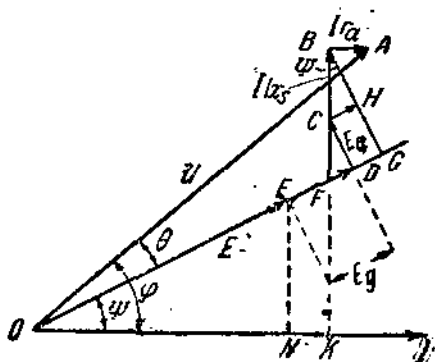


Рис. 109а.

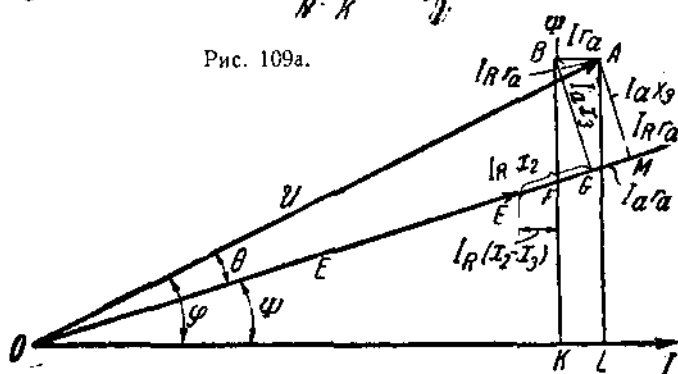


Рис. 109б.

Для установления влияния непостоянства реакции якоря на величину электромагнитной мощности P_a и вращающего момента

M_a рассмотрим под соответствующим углом зрения диаграмму напряжения Blondel-Arnold-La Cour (BAC) для синхронного двигателя при отставющем токе (рис. 109а). На этой диаграмме приведены составляющие приложенного напряжения U , компенсирующие обратную э. д. с. E (составляющая OE), э. д. с. от продольного поля реакции якоря E_g (составляющая ED), э. д. с.

от поперечного поля реакции якоря E_q (составляющая DC) и реактивное и активное падения напряжения Ix_s и Ir_a (составляющие CB и BA). Для простоты указанные составляющие обозначены непосредственно теми э. д. с., которые они компенсируют (эти э. д. с. равны им, но направлены в противоположную сторону).

Продолжим отрезок OD и опустим на него из точки B перпендикуляр BH . На последний опустим из точки C перпендикуляр CH . Кроме того продолжим отрезок BC до пересечения в точке F с линией OD . После этих вспомогательных построений можем написать:

$$BH = BC \cos \angle CBH.$$

Приняв во внимание, что

$$\angle CBH = \psi; \quad BC = Ix_s,$$

представим отрезок BH в следующем виде:

$$BH = Ix_s \cos \psi = I_a x_s,$$

где I_a — активная составляющая тока I двигателя.

Отрезок HG равен $E_q = I_a x_q$.

Следовательно,

$$BG = BH + HG = I_a x_s + I_a x_q = I_a (x_s + x_q).$$

Далее имеем:

$$DG = CH = Ix_s \sin \psi = I_R x_s,$$

где I_R — реактивная составляющая тока I двигателя.

Так как

$$ED = E_g = I_R x_s,$$

то можем написать, что

$$E_o = ED + DG = I_R (x_g + x_s).$$

Таким образом

$$x_s + x_q = x_3 \text{ и } x_s + x_g = x_2,$$

где x_2 является полной реакцией реактивной составляющей тока I , а x_3 — полной реакцией активной составляющей последнего.

Следовательно,

$$BG = I_a x_3 \text{ и } EG = I_R x_2.$$

При совпадении осей полюсов и осей катушек якоря (какой-либо фазы обмотки) реакция машины равна x_2 (реактивный ток имеет максимальное значение, а активный ток равен нулю). При расположении сторон катушек против середины полюсов ротора реакция машины становится равной x_3 (в этот момент $I_R = 0$, а $I_a = \text{тах}$).

В промежуточных положениях ротора реакция якоря имеет соответственно промежуточное значение между предельными значениями x_2 и x_3 . Следовательно, реакция периодически колеблется около своего среднего значения:

$$\frac{1}{2} (x_2 + x_3).$$

Отклонения реакции от среднего значения равны

$$\pm \frac{1}{2} (x_2 - x_3).$$

Среднее значение синхронной реакции машины можно представить так:

$$x_a = \frac{1}{2} (x_2 + x_3) = x_s + \frac{1}{2} (x_g + x_d).$$

В машине с неявно выраженными полюсами при слабом насыщении реакция реактивного тока примерно равна реакции активного тока (длины путей, по которым замыкаются поперечный и продольный потоки, различны и при неявно выраженных полюсах). В этом случае можно считать, что $x_a = x_2 = x_3 = \text{const}$ и диаграмма ВАС переходит в диаграмму Бен-Эшенбурга.

При рассмотренном разложении реакции якоря имеются лишь две (рис. 109а) реактивные составляющие

$$I_a x_2 = BG \text{ и } I_R x_2 = EG.$$

При равенстве $x_2 = x_3$ результирующая этих составляющих была бы перпендикулярна вектору тока I ; в частности, если $x_a = x_3$, то конец указанной результирующей оказался бы в точке F , а не в точке E , как это имеет место при неравенстве реакций. Это неравенство может характеризоваться отрезком

$$EF = EG - FG = I_R x_2 - I_a x_3 \operatorname{tg} \psi = I_R x_2 - I_R x_3 = I_R (x_2 - x_3).$$

101. Выражения для мощностей синхронного двигателя с явно выраженными полюсами. Выше было указано, что в случае машины с явно выраженными полюсами реакция ее колеблется в пределах $x_2 \div x_3$. Теперь надлежит рассмотреть, в какой мере влияет непостоянство реакции на выражения для мощностей синхронного двигателя и как сказывается это обстоятельство на его работе.

Обратимся вновь к диаграмме на рис. 109 и произведем на ней некоторые дополнительные построения, а именно (рис. 109б): из точек B и A опустим перпендикуляры BK и AL на ось абсцисс и перпендикуляры BG и AM на продолжение вектора E .

Отметим, что отрезок

$$GM = I \cos \psi r_a = I_a r_a,$$

далее

$$EG = I_R x_2;$$

$$AM = I_a x_3 - I \sin \psi r_a = I_a x_3 - I_R r_a;$$

$$EF = I_R (x_2 - x_3),$$

что было установлено в предыдущем параграфе.

Из диаграммы можем написать:

$$U^2 = (\pm E - I_R x_2 - I_a r_a)^2 + (I_a x_3 - I_R r_a)^2, \quad (80)$$

где знак плюс перед E — для режима генератора, а знак минус — для режима двигателя.

Пренебрегая вторым членом за его сравнительной малостью, имеем:

$$U = \pm E - I_R x_2 - I_a r_a. \quad (81)$$

Определим далее из полученного выражения реактивную составляющую тока:

$$I_R = \pm \frac{E - U}{x_2} - I_a \frac{r_a}{x_2}. \quad (82)$$

Точное выражение для $\pm I_R$ получается из полного соотношения (80):

$$I_R = \pm \frac{\sqrt{U^2 \cdot (x_2^2 + r_a^2) - [I_a (r_a^2 + x_2 x_3) \pm E r_a]^2 \pm E x_2 - r_a (x_2 - x_3) I_a}}{(x_2^2 + r_a^2)} \quad (83)$$

Упрощенная формула для I_R дает достаточно правильные значения при небольших относительно токах. Из нее видно, что ток I_R в основном определяется величиной x_2 , так как $I_a r_a$ мало по сравнению с $I_R x_2$.

По приведенным формулам, задавшись некоторыми значениями U, E, I_a , можно вычислить I_R и, далее, $\cos \varphi$.

Определим теперь величины полной и электромагнитной мощностей.

Из диаграммы на рис. 109b можем написать

$$\begin{aligned} U \cos \varphi &= OL = OK + KL = OF \cos \psi + AB = \\ &= [\pm E - I_R (x_2 - x_3)] \cos \psi - (\pm I r_a). \end{aligned}$$

Здесь знак плюс перед E и $I r_a$ относятся к режиму генератора, а знак минус — к режиму двигателя.

Умножив обе части этого выражения на $m I$, получим выражение для мощности P_1 , поступающей из сети (режим двигателя) или отдаваемой в сеть (режим генератора).

$$P_1 = m I U \cos \varphi = m I \{ [\pm E - I_R (x_2 - x_3)] \cos \psi - (\pm I r_a) \}. \quad (84)$$

Зная величину мощности P_1 , можем определить и величину электромагнитной мощности P_a , для чего, в случае генератора, нужно к P_1 прибавить потери в меди статора $m I^2 r_a$, а в случае двигателя вычесть их, т. е.

$$P_a = P_1 \pm m I^2 r_a,$$

так как в первом случае электромагнитная мощность направлена от ротора к статору, а во втором — от статора к ротору.

Для режима генератора получим:

$$P_{a2} = P_1 + m I^2 r_a = m I [E - I_R (x_2 - x_3)] \cos \psi. \quad (85)$$

Для режима двигателя выражение для P_a будет иметь вид:

$$P_{a0} = P_1 - m I^2 r_a = -m I [-E - I_R (x_2 - x_3)] \cos \psi. \quad (86)$$

Сопоставим полученные выражения с выражением для электромагнитной мощности при неизменной реакции:

$$P_a = \pm m I E \cos \psi.$$

Мы видим, что при тех же токах и э. д. с. электромагнитная мощность при переменной реакции отличается от мощности двигателя с постоянной реакцией. Таким образом наличие явно выраженных полюсов сказывается на работе синхронной машины в отношении величины ее электромагнитной мощности, состоящей как бы из двух частей: мощности, имеющей место в подобной машине, но с неявно выраженными полюсами:

$$P_{a0} = \pm m E I \cos \psi$$

и мощности, обусловленной изменением реакции якоря и равной

$$P_R = \mp m I I_R (x_2 - x_3) \cos \psi = \mp m I_a I_R (x_2 - x_3), \quad (87)$$

(Знак минус для режима генератора, знак плюс для режима двигателя.) Очевидно, что при $x_2 = x_3$ вторая часть превращается в нуль. Наличие второй части мощности P_a в машине с явно выраженными полюсами вытекает и из непосредственного рассмотрения диаграммы ВАС, для машины с переменной реакцией (рис. 109а). Действительно, в машине с неявно выраженными полюсами (диаграмма Бен-Эшенбурга) э. д. с. E_a , результирующая двух э. д. с. от реакции якоря E_q и E_g , расположена под прямым углом к вектору тока I (поэтому-то в машине с неявно выраженными полюсами нет оснований разделять э. д. с. E_a на э. д. с. E_q и E_g). Такое расположение вектора E_a свидетельствует, что э. д. с. E_a является чисто безваттной составляющей приложенного напряжения. Иное дело в машине с явно выраженными полюсами. Здесь результирующая э. д. с. $E_a = EC$ (рис. 109а) оказывается расположенной не под прямым углом к вектору тока. Проекция ее на вектор тока равна некоторой величине KN . Умножение последней на mI и дает вторую часть E_R мощности P_a при явно выраженных полюсах: $I_R = KN m I$. Действительно, величину KN можно представить как

$$KN = EF \cos \psi = I_R (x_2 - x_3) \cos \psi.$$

Отсюда

$$P_R m I I_R (x_2 - x_3) \cos \psi = m I_a I_R (x_2 - x_3).$$

Мощность P_R может и вычитаться и складываться с мощностью P_{an} , что зависит, во первых, от характера реактивного тока, так как при упреждающем токе I_R входит с минусом, а при отстающем — с плюсом, а во вторых, от того, какая из величин x_2 и x_3 больше (обычно $x_2 > x_3$).

Таким образом могут иметь место следующие случаи соотношения между указанными мощностями:

I. Реакция продольного поля x_2 больше, чем реакция поперечного поля x_3

$$(x_2 > x_3).$$

а) Ток отстающий, т. е. I_R берется с положительным знаком.
Режим генератора

$$P_a = P_{an} - P_R < m E I \cos \psi.$$

Режим двигателя

$$P_a = P_{an} + P_R > m E I \cos \psi.$$

б) Ток упреждающий, т. е. I_R берется с отрицательным знаком.
Режим генератора

$$P_a = P_{an} + P_R > m E I \cos \psi.$$

Режим двигателя

$$P_a = P_{an} - P_R < m E I \cos \psi.$$

II. Реакция поперечного поля x_3 больше реакции продольного поля x_2 ($x_3 > x_2$).

а) Ток отстающий.
Режим генератора

$$P_a = P_{an} + P_R > m E I \cos \psi.$$

Режим двигателя

$$P_a = P_{an} - P_R < m E I \cos \psi.$$

б) Ток упреждающий.
Режим генератора

$$P_a = P_{an} - P_R < m E I \cos \psi.$$

$$P_a = P_{an} + P_R > mEI \cos \psi.$$

В § 92 указывалось, что при наличии явно выраженных полюсов на роторе последний может быть лишен возбуждения при сохранении двигателя свойств синхронного двигателя. Работа такого двигателя будет осуществляться за счет возникновения момента при сдвиге ротора на угол θ благодаря изменению магнитной проводимости или, как можно сказать теперь иначе, — благодаря разности реакций для поперечного и продольного полей якоря.

При рассмотрении физической картины работы синхронного двигателя (рис. 103) указывалось, что синхронная машина без возбуждения может работать и в генераторном режиме. Работу синхронной машины с возбуждением и явно выраженными полюсами по существу можно, в развитие представления о двух частях (P_{an} и P_R) электромагнитной мощности P_a , рассматривать как совместную работу двух синхронных машин: одной машины с возбуждением и неявно выраженными полюсами, т. е. с постоянной реакцией (мощность $P_a = P_{an} = mEI \cos \psi$) и второй машины с явно выраженными полюсами без возбуждения (электромагнитная мощность этой машины $P_a = P_R$). В зависимости от характера реактивного тока (упреждающий или отстающий) обе машины могут работать или в одном режиме или в различных.

Возьмем, например, случай $x_2 > x_1$. При отстающем токе и работе суммарной машины двигателем обе отдельные машины работают в режиме двигателя и мощности их складываются. Наоборот, если при помощи возбуждения суммарной машины реактивный ток сделать упреждающим, то вторая машина (с мощностью P_R) будет работать генератором и мощность суммарной машины (т. е. машины с возбуждением и явно выраженными полюсами) уменьшится. Следует отметить, что мощность реактивной машины $P_R = mI_a I_R (x_2 - x_1)$ при определенном значении $x_2 - x_1$ зависит от величины I_R , т. е. от возбуждения суммарной машины. Так, при соответствующей регулировке возбуждения, дающей угол $\psi = 0$, I_R также окажется равным нулю, а следовательно и мощность P_R реактивной машины будет равна нулю. В этом случае работа машины с явно выраженными полюсами ничем не будет отличаться от работы машины с постоянной реакцией. Очевидно, что если, наоборот, суммарную машину, работающую, например, в режиме двигателя, лишить возбуждения, то она превратится в реактивный синхронный двигатель, т. е. будет работать с мощностью P_R (в том случае, конечно, если момент нагрузки не окажется больше опрокидывающего момента реактивного двигателя). Интересно отметить, что при работе суммарной машины двигателем с упреждающим током реактивная машина работает в режиме генератора (см. выше). Однако при снятии возбуждения она перейдет в режим реактивного двигателя, причем в статор будет поступать отстающий ток.

Аналитическое выражение зависимости P_a от угла θ показывает, что кривая для P_a в нормальных машинах с переменной реакцией мало отличается от аналогичной кривой, построенной в предположении постоянства реакции. Абсолютный максимум для P_a получается также равным приблизительно $\frac{U^2}{4r_a}$. Таким образом в нормальных условиях работы суммарного двигателя мощность P_R составляет небольшую часть мощности P_a .

Надлежит отметить, что реакции x_2 и x_3 изменяются от изменения нагрузки, причем изменение реакции x_3 обычно незначительно, в то время как изменение x_2 может быть довольно ощутимым.

Из диаграммы рис. 109b можем написать

$$\sin \theta = \frac{I_a x_2 - I_R r_a}{U},$$

откуда определим I_a :

$$I_a = \frac{U \sin \theta + I_R r_a}{x_2}.$$

Последнее выражение показывает, что активный ток зависит главным образом от реакции активного тока и от угла θ .

Работа синхронного двигателя в качестве реактивного имеет большое значение для схем синхронной связи, в которых реактивный двигатель нашел широкое применение.

ГЛАВА XVIII.

СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ БЕЗ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА РОТОРЕ.

102. Общие положения. Всякая схема синхронной связи требует по причинам экономии и надежности минимального количества соединительных проводов между командным и приемным постами. В схемах на переменном токе переменной частоты с синхронными двигателями, в случае применения нормальных синхронных двигателей с возбуждением постоянным током, приходится между приемным и командным постами иметь две линии — одну линию трехфазного тока переменной частоты (линия управления) и вторую линию постоянного тока (линия возбуждения) или можно обойтись одной трехфазной линией, а для возбуждения устанавливать на каждом посту источник постоянного тока. Тенденция к упрощению подобной схемы выдвинула идею использования в качестве приемников синхронных двигателей без возбуждения. Последние требуют лишь трех проводов (трехфазная линия) между командным и приемным постами. Особенно удачное применение нашли синхронные двигатели без возбуждения в схемах для передачи на расстояние небольших мощностей, где основные недостатки таких двигателей (низкий коэффициент мощности, небольшой вращающий момент, сравнительно большие габариты) не играют существенной роли. Вместе с тем простота устройства и эксплуатации послужили к широкому распространению подобного типа двигателя в схемах синхронной связи малой и средней мощности.

Конструкция синхронного двигателя без возбуждения может быть самой различной в зависимости от мощности и устройства всей схемы в целом.

Под синхронным двигателем без возбуждения на роторе (или, иначе говоря, с односторонним питанием) следует понимать вообще электрический двигатель, ротор которого вращается в строгом соотношении (в синхронизме) с частотой или числом импульсов питающего двигателя переменного или пульсирующего тока.

Синхронный же двигатель с двойным питанием (напряжение подводится и к статору и ротору) представляет собой электрический двигатель, ротор

которого вращается в строгом соответствии с сочетанием частот питающих статор и ротор токов (подробнее об этом см. далее).

Синхронный двигатель без возбуждения выполняется как с ротором, имеющим вращательное движение, так и с ротором, обладающим качательным или возвратнопоступательным движением.

Питание синхронных двигателей может осуществляться трехфазным или однофазным переменным током (синусоидальной, ступенеобразной, трапецеидальной или другой формы) или же чередующимися в определенной последовательности импульсами постоянного тока, создающими три сдвинутые во времени и пространстве пульсирующие поля (подобно тому, как это имеет место, например, в машине Шербиуса). Конечно, конструкция во всех этих случаях будет различна.

Следует отметить, что большинство типов двигателей без возбуждения на роторе по существу могло бы быть выполнено и с возбуждением постоянным током, что усилило бы их вращающий момент. Однако, как уже отмечалось, внесение возбуждения на ротор лишает двигатель простоты. Поэтому мы рассмотрим вначале двигатели без возбуждения, а затем перейдем к рассмотрению некоторых конструкций двигателей с возбуждением, представляющих собой развитие отдельных типов двигателей без возбуждения.

Рассмотрение работы нормального двигателя с возбуждением в принципиальной плоскости нами предпослано настоящей главе в целях более простого и полного усвоения теории синхронных двигателей без возбуждения.

Кроме того, применение в синхронной передаче мощных источников переменного тока переменной частоты (генератор Костенко—Япольского, машина Шербиуса) выдвигает вопрос о применении синхронных двигателей нормального типа, видоизмененного лишь в расчетной плоскости для получения требуемых наивыгоднейших характеристик в применении к работе двигателя в схемах синхронной связи.

Первоначально будут рассмотрены двигатели с эластичной связью с осью, в частности синхронный реактивный двигатель с вращающимся полем, от которого мы затем перейдем к импульсным двигателям с эластичной связью с осью и, наконец, к двигателям с жестким сцеплением с осью.

103. Синхронный реактивный двигатель. Под реактивным двигателем в узком смысле этого слова часто понимают синхронный двигатель, выполненный по типу обычного синхронного двигателя, т. е. с нормальной обмоткой переменного тока на статоре, но лишенного обмотки возбуждения на роторе, снабженном полюсными выступами из мягкого железа.

Однако по принципу реактивного двигателя работают многие синхронные двигатели, конструктивно довольно значительно отличающиеся от приведенной выше характеристики и вместе с тем обладающие общим отличительным признаком, а именно: ротором с полюсными выступами и без обмотки (колесо Лакура, двигатель Сперри и т. п.). Поэтому определение понятия „реактивный синхронный двигатель“ нужно брать в расширенном смысле, подводя под него конструктивно различные, но работающие по общему принципу двигатели.

Исторически принцип работы реактивного двигателя был установлен как частный случай (один из возможных режимов работы) обычного синхронного двигателя с возбуждением постоянным током. Так, в 1874 г. Сименс обнаружил, что синхронный однофазный двигатель может работать

в синхронизме и при отсутствии возбуждения на роторе. В 1878 г. Лакуром была предложена своеобразная конструкция реактивного двигателя, названного его именем (колесо Лакура или фоническое колесо). Наконец, в 1895 г. Блонделем (Blondel) рассмотрен вопрос о разложении ампервитков якоря относительно оси полюсов на продольные и поперечные. Можно считать, что лишь с этого времени было положено начало развитию теории реактивного двигателя, хотя практическое его использование в различных конструктивных вариантах началось ранее.

Благодаря простоте своей конструкции реактивный двигатель получил широкое применение прежде всего во всевозможных физических приборах там, где требуется постоянная скорость вращения. С развитием автоматического управления на расстоянии реактивный двигатель оказался весьма удобным и для схем синхронной связи как по своей конструкции, так и благодаря сравнительно небольшому числу соединительных проводов. Наконец, развившиеся за последние годы звуковое кино и передача изображений на расстояние, для которых необходима синхронизация вращения ряда осей, требуют применения простых синхронных двигателей небольшой мощности, в качестве которых и применяются реактивные синхронные двигатели различной конструкции.

Вообще надо отметить, что необходимость лишь одного вида тока и отсутствие колец, щеток и, следовательно, трущихся контактов делают указанный двигатель удобным для применения в самых разнообразных случаях, когда требуется синхронная скорость вращения при небольшом вращающем моменте. Применению синхронных реактивных двигателей средней и большой мощности препятствует то обстоятельство, что, во-первых, при данных одинаковых габаритах с синхронным двигателем реактивный двигатель развивает значительно меньший момент, а затем имеет низкий коэффициент мощности (менее 0,5).

104. Принцип работы трехфазной реактивной машины. В § 92 уже отмечалось, что если в синхронном двигателе с возбуждением на роторе начать уменьшать последнее, то недостающие ампервитки возбуждения будут поступать из сети, причем общая сумма ампервитков возбуждения при неизменном приложенном напряжении останется примерно неизменной по условиям электромагнитного равновесия. Далее, указывалось, что в случае явно выраженных полюсов на роторе, т. е. при наличии различных реактивных сопротивлений для потоков реакции, создаваемых активной и реактивной составляющими тока якоря, электромагнитная мощность синхронной машины будет обуславливаться не только величиной $m E I \cos \phi$, но и изменением реактивного сопротивления от значения x_2 до значения x_3 . Величина последней части мощности синхронной машины равна:

$$P_a = \mp m I_a I_R (x_2 - x_3).$$

Указывалось, что эту часть мощности можно рассматривать как мощность отдельной реактивной машины, причем в этом случае знак минус относится к работе машины в режиме генератора, а знак плюс — к работе ее в режиме двигателя.

Если возбуждение на роторе прервать, то, во-первых, машина будет целиком возбуждаться со стороны статора, а во-вторых, может дать генераторную или двигательную мощность, равную указанному выше значению.

Из выражения для P_a видно, что при $x_2 > x_3$ для работы генератором реактивной машины необходимо возбуждать ее упреждающим током ($-I_R$). При работе двигателем в статор будет поступать отстающий ток ($+I_R$).

Реактивный ток I_R создает в машине магнитное поле, которое ранее вызывалось током обмотки возбуждения. Указанный ток I_R создает э.д.с. машины $I_R (x_2 - x_3)$, которая при работе генератором будет совпадать по фазе с активным током, а при работе двигателем окажется сдвинутой на 180° по отношению к этому току.

Ток I_a и э. д. с. $I_R (x_2 - x_3)$ обуславят наличие электромагнитной мощности

$$P_a = m I_a I_R (x_2 - x_3),$$

передаваемой со статора на ротор или наоборот.

Таким образом мы рассмотрели постепенный переход от синхронной машины с возбуждением к синхронной реактивной машине, причем выяснили, что работа последней обусловлена периодическим изменением сопротивления магнитной цепи благодаря прохождению перед катушками обмотки статора полюсных выступов.

Магнитный поток возбуждения в машине создается м. д. с. реактивной составляющей тока статора (отстающей — в двигателе и опережающей — в генераторе). Следовательно, магнитная система машины возбуждается за счет реакции якоря (отсюда и термин — реактивная машина). Если реакция якоря постоянна, что может быть лишь при отсутствии выступов на роторе, то вращающийся магнитный поток не будет синхронно увлекать за собой ротора, если не считать момента от гистерезиса (об этом см. далее), так как любое положение последнего дает для потока одинаковую проводимость. Поэтому в данном случае возможна работа машины лишь в асинхронном режиме.

105. Картина распределения магнитного потока в реактивном двигателе. Для уяснения работы реактивного двигателя можно представить себе модель (рис. 110), аналогичную модели, изображенной на рис. 102 и 103 для синхронного двигателя с возбуждением на роторе. Модель состоит из двух колец (внешнего и внутреннего) с полюсными выступами. Внешнее кольцо, представляющее собой ротор, имеет полюса N, S , создающие поток в магнитной системе модели. Внутреннее кольцо (ротор), выполненное из мягкого железа, имеет выступы 1, 2, 3, 4... без какой-либо обмотки. Оба кольца могут вращаться вокруг одной общей оси. Вращение внешнего кольца соответствует вращению магнитного поля статора, а вращение внутреннего кольца представляет собой вращение ротора. При идеальном холостом ходе двигателя (отсутствие потерь) имеет место картина распределения потока, представленная на рис. 110,а. Магнитный поток статора стремится пройти по пути с наименьшим магнитным сопротивлением. Поэтому он ориентирует выступы ротора так, что их оси совпадают с осью потока (в модели этому соответствует совпадение осей полюсов статора и выступов ротора). Картина по рис. 110,а будет иметь место вне зависимости от того, вращается ли поле статора или оно неподвижно в пространстве (возбуждение постоянным током). Если пренебречь потерями, то при вращении внешнего кольца последнее будет увлекать за собой внутреннее кольцо без какого-либо сдвига осей полюсов в пространстве. В поло-

жении покоя (питание обмотки статора постоянным током) будет также иметь место совпадение осей полюсов статора и полюсных выступов ротора.

Если теперь вал ротора нагрузить каким-либо тормозящим моментом, то ротор сдвинется относительно статора в сторону действия груза, при-

чем магнитные линии по причине изменения проводимости магнитному потоку претерпят деформацию, которая обусловит в тяжении магнитных линий касательную составляющую, направленную по окружности ротора в сторону, противоположную действию груза. Указанная касательная составляющая и даст статический или вращающий момент двигателя. Ротор окажется сдвинутым по отношению поля статора на неизменный для данной нагрузки угол θ .

Таким образом первые две картины распределения магнитных линий в реактивной машине ничем не отличаются (в качественном, а не в количественном отношении) от распределения магнитных линий, представленного на рис. 103, а и б для синхронного двигателя с возбуждением. Очевидно, если бы ротор на рис. 110 был выполнен без выступов, т. е. в виде гладкого

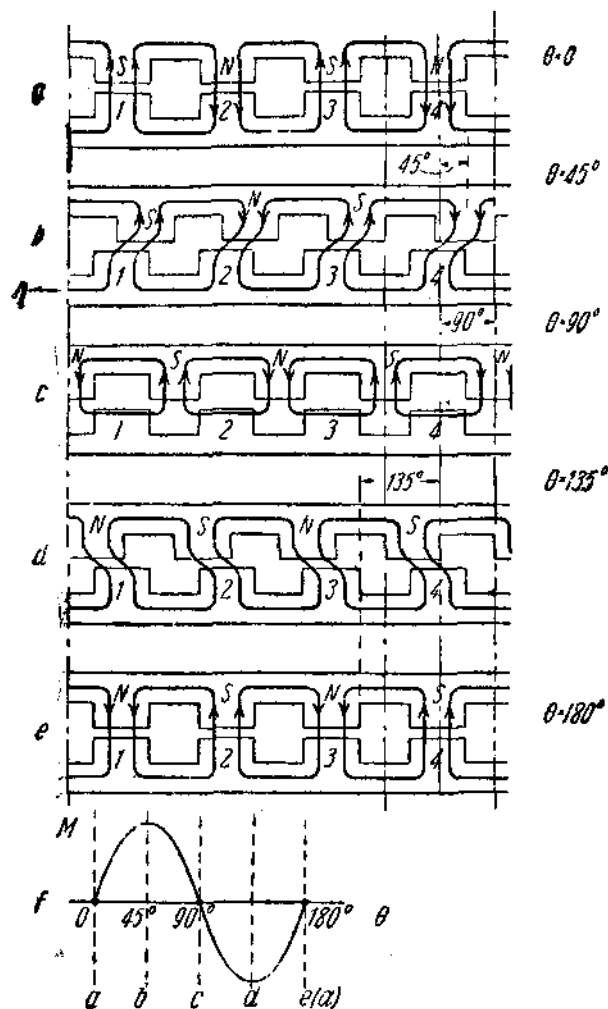


Рис. 110.

цилиндра из мягкого железа, то при поворачивании ротора относительно полюсов статора никакого касательного усилия к окружности ротора не возникло бы, так как проводимость для магнитных линий статора при любом положении ротора была бы одинаковой и поэтому ротор не удерживался бы в каком-либо определенном положении относительно полюсов статора.

Распределение магнитных линий при дальнейшем сдвигании полюсных выступов ротора относительно полюсов статора будет отличаться от

распределения магнитных линий в синхронном двигателе с возбуждением на роторе. На фиг. 110, б ротор сдвинут относительно статора на угол $\theta = 45^\circ$. При сдвиге на угол $\theta = 90^\circ$ имеет место распределение магнитных линий, изображенное на рис. 110, с. Последнее распределение резко отличается от распределения магнитных линий для двигателя с возбуждением на роторе при $\theta = 90^\circ$ (рис. 103, б).

Указанная разница определяется тем, что в последнем случае на роторе имеется неизменная полярность, которая и ориентирует относительно себя магнитные линии статора, и наоборот. В случае же реактивного двигателя ротор собственной полярности не имеет, а представляет собой лишь магнитопровод для магнитных линий статора с большей ($\theta = 0$) или меньшей ($\theta = 90^\circ$) проводимостью, что зависит от расположения выступов ротора относительно полюсов статора.

При расположении ротора по фиг. 110, с ($\theta = 90^\circ$) путем наименьшего сопротивления для магнитных линий является путь поперек полюсных выступов ротора (поле статора в этом случае является поперечным полем). Положение ротора при $\theta = 90^\circ$ по рис. 103, б соответствует максимальному развиваемому двигателем моменту, в то время как в реактивном двигателе момент при $\theta = 90^\circ$ равен нулю, так как касательное усилие равно нулю и полюсные выступы ротора в равной мере притягиваются к двум соседним полюсам (неустойчивое положение). Это подтверждается и с точки зрения общих положений условия образования вращающего момента в двигателе, приведенных в § 95. Там указывалось, что момент может быть выражен следующим образом:

$$M = A W_s \Phi_R \sin (A W_s \Phi_R) = A W_R \Phi_s \sin (A W_R \Phi_s).$$

Значит, для получения момента в двигателе необходимо наличие трех факторов: рабочих ампервитков $A W_s \sin (A W_s \Phi_R)$ (поперечного потока) и намагничивающего потока (продольных ампервитков), причем возникно-

вление угла $(A W_s \Phi_R)$ под действием тормозящего момента обуславливает появление поперечных ампервитков. Следовательно, для образования момента необходимо наличие продольных и поперечных ампервитков (это справедливо, как известно, не только для синхронных машин; подобное соотношение особенно выпукло чувствуется в машинах постоянного тока и т. д.).

Реактивная машина имеет один поток, создаваемый обмоткой статора, но он в зависимости от положения ротора может иметь две или одну составляющие. Так, на рис. 110, а, весь поток является продольным (одна составляющая), в то время как на рис. 110, б этот поток образован двумя составляющими, на которые он и может быть разложен, — продольная (намагничивающая) составляющая и поперечная (искажающая) составляющая, дающие вращающий момент. В противоположность рис. 110, а поток на рис. 110, с, в силу сдвига выступов ротора на 90° и отсутствия на них самостоятельного возбуждения, является целиком поперечным (продольный поток отсутствует), благодаря чему нет взаимодействия между полюсами статора и выступами ротора. В этом же положении в двигателе с возбуждением на роторе имеет место и продольное и поперечное поле, что обуславливает наличие вращающего момента. При дальнейшем увеличении угла в этом двигателе поперечный поток увеличивается, но продольный уменьшается и, наконец, при $\theta = 180^\circ$ оба потока (статора и ротора) превращаются в поперечные и момент становится равным нулю. Следует

заметить, что двигатель попадает в режим короткого замыкания и имеет лишь потоки рассеяния, замыкающиеся через воздух.

Иная картина получается для реактивного двигателя. Положение его при $\theta = 90^\circ$ при наличии тормозящего момента переходит в положение на рис. 110, d, которое соответствует положению по рис. 103, e в двигателе с возбуждением на роторе при угле $\theta > 180^\circ$. При сдвигании ротора реактивного двигателя на 180° имеет место распределение магнитных линий, указанное на рис. 110, e (аналогичное рис. 110, a), при котором момент M двигателя равен нулю. Если опять-таки сравнить это положение с положением по рис. 103 (тоже сдвиг на 180°), то оказывается, что распределение магнитных линий по рис. 110, e, подобное исходному распределению (рис. 110, a), дает устойчивое положение, в то время как распределение по рис. 103, d, обуславливает неустойчивое положение, из которого ротор может быть выведен небольшим внешним моментом в ту или иную сторону.

При синусоидальном распределении потока и таком же его изменении кривая вращающих (в частности статических) моментов получится также примерно синусоидальной. При сдвиге ротора на 45 электрических градусов наступает максимум момента (рис. 110, f). Далее, при $\theta = 90^\circ$ имеет место $M = 0$ при неустойчивом положении ротора. Наконец, при $\theta = 180^\circ$ восстанавливается исходное устойчивое положение при $M = 0$ (синхронизирующий момент имеет максимальное положительное значение). Таким образом кривая вращающих моментов реактивного двигателя, представленная на рис. 110, f, будет иметь полный период, укладывающийся в 180 электрических градусов, в то время как в синхронном двигателе с возбуждением на роторе полный период будет соответствовать 360 электрическим градусам. Следовательно, в одном случае устойчивое положение ротора наступает через каждые 180 электрических градусов, а в другом — через 360 электрических градусов.

Существенно еще раз подчеркнуть то обстоятельство, что максимум вращающего момента наступает в реактивном двигателе при $\theta \approx 45^\circ$ (в двигателе с возбуждением на роторе при $\theta \approx 90^\circ$).

Ранее указывалось, что электромагнитная мощность P_a и момент синхронного двигателя пропорциональны $\sin \theta$ (при неизменных других величинах). На основании рассмотрения картин, представленных на рис. 110, получим, что для реактивного двигателя мощность P_a и момент должны быть пропорциональны $\sin 2\theta$, так как в последнем случае период кривых вдвое короче.

В действительности кривая моментов реактивного двигателя в практических конструкциях довольно сильно отступает от синусоиды. Форма ее зависит от интенсивности изменения магнитной проводимости или магнитного сопротивления при повороте ротора относительно статора. Поэтому форму полюсных наконечников стремятся так сконструировать, чтобы кривая моментов шла как можно круче, т. е. чтобы проводимость менялась как можно сильнее. Тогда небольшим θ углам будут соответствовать большие значения моментов, что повысит точность передачи.

Наличие меняющейся проводимости, а следовательно и переменного полного реактивного сопротивления машины, обусловит возникновение в машине поперечного поля, которое совместно с продольным потоком машины создаст вращающий момент. Двигатель будет развивать мощность

за счет активного тока, который поступит в двигатель при угле $\theta = 0$ и создаст поперечное поле реакции якоря.

106. Общее выражение для статического момента реактивного двигателя. В положении покоя ротора синхронного двигателя, находящегося под напряжением, статор питается постоянным током ($f = 0$). Величины тока в отдельных фазах определяются активным сопротивлением обмотки статора и распределением потенциала на щетках командного устройства. Создаваемое током поле ориентирует ротор реактивного двигателя так, чтобы он представлял собой наименьшее сопротивление для магнитных линий указанного поля. Для получения выражения статического момента реактивного двигателя, так же, как и при выводе статического момента синхронного двигателя с возбуждением (§ 98), надлежит учесть, что ток в статоре остается неизменным при любом значении статического момента, так как приложенное напряжение постоянно и частота равна нулю. Изменяющимся является поток благодаря изменению проводимости при повороте ротора относительно статора. При $f \neq 0$ и вращении двигателя имеет место обратное соотношение: поток примерно остается постоянным, а меняется ток в соответствии с изменением реактивного сопротивления при изменении угла θ .

Как известно, вращающий, в частности статический, момент, испытываемый выступом ротора при отведении его от полюса статора, можно рассматривать как производную полной электромагнитной энергии системы по угловому перемещению ротора (угол θ).

Таким образом можно написать:

$$M = \frac{dA}{d\theta}.$$

Величина электромагнитной энергии A определяется следующим образом:¹

$$A = \frac{1}{8\pi} \int_V H B dV = \frac{1}{8\pi} \int \int \int H B dx dy dz = \frac{1}{8\pi} \int H B S d\theta,$$

где H — напряжение магнитного поля, B — индукция, V — объем, в котором заключается рассматриваемая электромагнитная энергия, S — площадь поперечного сечения магнитопровода.

Величина H равна: $H = 0,4 \pi AW$.

Выражение для A можно представить так:

$$A = \frac{1}{8\pi} \int_0^\theta H \Phi d\theta = \frac{1}{8\pi} \int_\Phi H d\Phi.$$

Величина Φ , как известно, равна:

$$\Phi = 0,4 \pi AW \lambda,$$

где λ — проводимость магнитной цепи.

Мы уже отмечали, что при $f = 0$ величина тока в статоре неизменна, т. е. $AW = \text{const}$.

¹ См. В. Ф. Миткевич, Физические основы электротехники, 1932 г., стр. 77–78, § 20 и 21.

Подставляя значения H и Φ в выражение для A , получим:

$$A = \frac{1}{8\pi} (0,4 \pi AW)^2 \int d\lambda.$$

Далее, если $M = \frac{dA}{d\theta}$, то будем иметь:

$$M = \frac{dA}{d\theta} = \frac{1}{8\pi} (0,4 \pi AW)^2 \frac{d\lambda}{d\theta} \text{ диносантиметров} \quad (88)$$

или:

$$M = \frac{1}{24,65} \left(\frac{0,4 \pi AW}{1000} \right)^2 \cdot \frac{d\lambda}{d\theta} \text{ кгм.} \quad (89)$$

Таким образом, чем интенсивнее происходит изменение проводимости для магнитного потока, тем круче идет кривая моментов.

На рис. 111, а, б, с изображены три ротора реактивного двигателя с различными значениями $\frac{d\lambda}{d\theta}$. Наиболее крутая кривая моментов будет иметь место у двигателя с ротором по рис. 111, а (примерно кривая 1 на рис. 104). Более пологая кривая принадлежит двигателю с ротором по рис. 111, б (примерно кривая 2 на рис. 104). Очевидно, что если ротор выполнен в виде круглого, без всяких выступов, цилиндра из мягкого железа, то при повороте ротора изменения проводимости для магнитного потока вовсе не будет, так как в любом положении цилиндрический ротор в магнитном отношении имеет

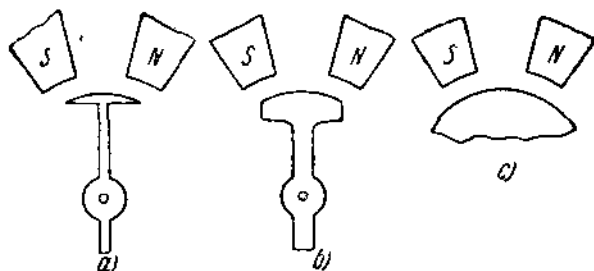


Рис. 111.

одинаковую проводимость. Следовательно в этом случае $\frac{d\lambda}{d\theta} = 0$. Поэтому кривая моментов совпадает с осью абсцисс, т. е. статический и вращающий моменты такого двигателя будут равны нулю при любом положении ротора (если не считать момента от гистерезиса; об этом см. далее). В силу указанных причин двигатель с цилиндрическим ротором целиком из мягкого железа может работать лишь в режиме асинхронного двигателя, а отнюдь не синхронного. Чтобы сообщить ему свойства последнего при цилиндрическом роторе, нужно применить обмотку возбуждения (синхронный двигатель с неявновыраженными полюсами на роторе). Тогда возникшие на роторе полюса будут взаимодействовать с полем статора, благодаря чему при повороте ротора магнитные линии потока машины претерпят деформацию (подобно тому, как это изображено на рис. 103, б), которая обусловит вращающий момент. Следовательно, для получения синхронного режима на роторе необходимы или полюса, создаваемые обмоткой возбуждения (явно- или неявновыраженные) или же просто полюсные выступы без обмотки (реактивный двигатель).

Из приведенного выше ясно, что работа реактивной машины в сильнейшей степени зависит от конструкции полюсных выступов ротора, которая

должна быть такой, чтобы имело место низкое магнитное сопротивление для продольного потока, т. е. в направлении оси полюсных выступов, и большое магнитное сопротивление для поперечного потока, т. е. в направлении, перпендикулярном оси полюсов.

Другими словами, полное реактивное сопротивление якоря при расположении сторон катушки статора между полюсными выступами ротора должно быть высоко, а при нахождении их под серединами этих выступов — мало. Кроме того, весьма важно, чтобы нарастание кривой моментов происходило как можно круче, т. е. чтобы при начальных небольших углах θ проводимость λ менялась интенсивно.

Если предположить, что проводимость меняется по синусоиде, то выражение для нее может быть представлено в следующем виде:

$$\lambda = \frac{1}{2} (\lambda_q + \lambda_g) - \frac{1}{2} (\lambda_g - \lambda_q) \cos 2\theta, \quad (90)$$

где λ_q и λ_g — соответственно поперечная и продольная проводимости, $\frac{1}{2} (\lambda_g + \lambda_q)$ — среднее значение проводимости, $\frac{1}{2} (\lambda_g - \lambda_q)$ — амплитуда изменяющейся части проводимости, налагающейся на среднее значение проводимости. При нулевом значении потока имеет место наименьшая проводимость, т. е. максимальное значение переменной части проводимости. Поэтому изменение происходит пропорционально $\cos 2\theta$, а не $\sin 2\theta$ (рис. 113, где представлено аналогичное изменение реактивного сопротивления машины).

Беря производную от λ по углу θ , получим:

$$\frac{d\lambda}{d\theta} = (\lambda_g - \lambda_q) \sin 2\theta. \quad (91)$$

Следовательно, в этом случае выражение для статического момента примет вид:

$$M = \frac{1}{24,65} \cdot \left(\frac{0,4 \pi AW}{1000} \right)^2 \cdot (\lambda_g - \lambda_q) \sin 2\theta \text{ кгм}. \quad (92)$$

Значения величин λ_g и λ_q могут быть определены из расчетных данных двигателя (величина междужелезного пространства, ширина полюсных выступов ротора, длина магнитной цепи и т. п.).

107. Процессы в электрической цепи реактивной машины. Ранее отмечалось, что мощность поступает в реактивную машину или отдается ею за счет изменения реактивного сопротивления от величины X_2 до величины X_3 .

Рассмотрим теперь физическую сущность явлений в электрической цепи реактивной машины, обуславливающую синхронную работу последней.

Для простоты возьмем однофазную реактивную машину (рис. 112), которую можно рассматривать и как одну фазу многофазной машины.

Изображенная на рис. 112 двухполюсная однофазная реактивная машина имеет на статоре обмотку в виде катушки K .

Ротор R выполнен с двумя полюсными выступами. Допустим, что ротор вращается синхронно с частотой питающего обмотку K переменного тока. В положении ротора, обозначенном на рис. 112 сплошной линией, реактивное сопротивление машины имеет наибольшую величину, так как проводимость для магнитного потока якоря наибольшая. Наоборот, при положении ротора, обозначенном пунктиром и отличающемся от первого

на 90° , будет иметь место наименьшая проводимость, т. е. наименьшее реактивное сопротивление. В первом случае поток будет замыкаться вдоль полюсных выступов (продольное поле), так как стороны катушки располагаются по обе стороны полюсных выступов, следовательно, величина реакции якоря равна x_2 (реакция якоря от реактивного тока). Во втором случае поток замыкается поперек полюсных выступов ротора (поперечное поле), так как стороны катушки располагаются под полюсными выступами, следовательно, величина реакции якоря равна x_2 (реакция якоря от активного тока).

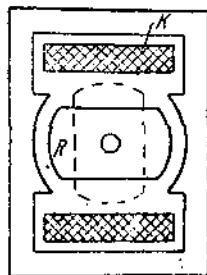


Рис. 112.

При повороте ротора на 180° (электрических) опять имеет место максимум реактивного сопротивления, равный x_2 . Таким образом, полный период изменения реактивного сопротивления соответствует 180° периода питающего машины тока. Следовательно, реактивное сопротивление изменяется с двойной частотой по сравнению с частотой сети.

Представим себе, что реактивная машина работает в режиме двигателя холостую и без каких-либо потерь холостого хода (идеальный случай). Тогда угол θ окажется равным нулю, т. е. оси полюсных выступов ротора будут совпадать с осью потока статора, в силу чего и максимум реактивного сопротивления статора, определяемый положением ротора, также окажется совпадающим с осью потока. В случае однофазной машины момент максимума пульсирующего потока будет при указанных идеальных условиях совпадать с моментом наступления максимума реактивного сопротивления x (рис. 113). Другими словами, максимум потока будет иметь место тогда, когда ротор займет положение, обозначенное на рис. 112 сплошной линией.

Так как мы пренебрегли всеми потерями, то в двигатель будет поступать чисто реактивный, намагничивающий ток, совпадающий по фазе с создаваемым им потоком, который индуцирует обратную э. д. с. E , уравновешивающую приложенное напряжение и равную $I x_2$ (активная составляющая тока равна нулю). Такой идеальный

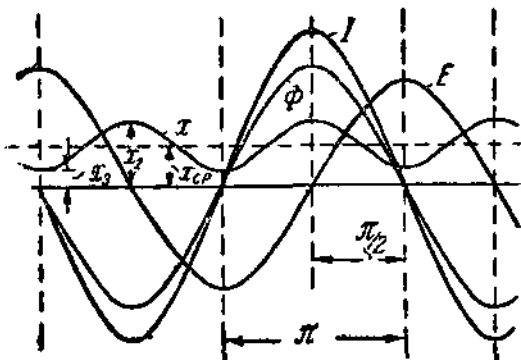


Рис. 113.

двигатель не потребляет никакой энергии, но и не развивает на своем валу никакого вращающего момента. Если бы на роторе не было выступов, то при любом положении ротора, вращаемого синхронно с полем статора, машина представляла бы собой приемник чисто реактивной мощности (при пренебрежении, конечно, потерями холостого хода и активным сопротивлением обмотки статора).

Пусть валу рассматриваемой машины с полюсными выступами сообщен некоторый тормозной момент. Тогда ротор двигателя несколько отстанет от поля статора (на угол θ) и далее, благодаря возникшей касательной тяжения магнитных линий, будет вращаться синхронно с полем. Очевидно,

что в этом случае максимумы потока Φ и реактивного сопротивления x разойдутся, потому что фаза последней кривой всецело зависит от положения ротора, который в данном случае сдвинулся относительно потока Φ на угол θ . Новое расположение кривых Φ и x изображено на рис. 114, б. Здесь кривая x сдвинулась в сторону отставания относительно Φ на угол θ . Благодаря этому обстоятельству кривая тока статора должна претерпеть изменение, в то время как кривая потока остается прежней, так как обуславливается приложенным напряжением, которое считаем постоянным по величине и синусоидальным по форме. Для создания магнитного потока при малом реактивном сопротивлении, т. е. при малой магнитной проводимости, требуется больший ток, чем для создания того же потока при большой магнитной проводимости, т. е. при большом реактивном сопротивлении. Поэтому максимум тока сместится в сторону меньшего реактивного сопротивления, т. е. в сторону упреждения магнитного потока. Форма кривой тока, благодаря несимметричному расположению кривой реактивного сопротивления и кривой потока, искажится и будет отличаться от синусоиды. Следовательно, поток Φ и ток I окажутся не в фазе, причем последний будет упреждать поток на некоторый угол, зависящий от угла θ и характера кривой реактивного сопротивления x . Кривая тока I может быть заменена эквивалентной ей синусоидой, сдвинутой по фазе относительно потока Φ . Ток I и э. д. с. E будут составлять угол ψ больший 90° , т. е. машина окажется в режиме двигателя. Если умножить ординаты кривой тока I на ординаты кривой э. д. с. $I_R (x_2 - x_3)$, то получим кривую мощности P , верхние площади которой будут меньше площадей нижних, что свидетельствует о том, что машина потребляет из сети некоторую мощность, идущую на создание вращающего момента на валу двигателя. Ток I можно разложить на две составляющих I_a и I_R , из которых вторая создаст продольное поле, индуктирующее обратную э. д. с. $I_R (x_2 - x_3)$, в то время как активная составляющая I_a создает поперечное поле, взаимодействующее с продольным полем. Электромагнитная мощность двигателя будет выражаться уже известным образом:

$$P_a = m I_a I_R (x_2 - x_3).$$

Следует заметить, что приложенное напряжение U в реактивном двигателе уравнивается тремя э. д. с. (падением напряжения от активного сопротивления пренебрегаем):

$$I_a x_3; I_R x_3 \text{ и } I_R (x_2 - x_3).$$

Первые две представляют собой реакцию якоря в машине с неявновыраженными полюсами, а последняя — э. д. с., возникшую благодаря изменению реакции якоря и являющуюся обратной э. д. с. машины, обуславливающей появление электромагнитной мощности, передаваемой со статора на ротор.

Явления, происходящие в реактивном двигателе при сдвигании ротора на угол θ под действием тормозящего момента, можно сравнить с явлением гистерезиса, имеющим место в электрических машинах и аппаратах переменного тока, например в трансформаторе.¹ В обоих случаях восходящая часть кривой потока требует большее число ампервитков, чем нисходящая, в силу чего кривая тока сдвигается в сторону опережения по отношению к магнитному потоку, т. е. возникает активная составляющая, производящая

¹ Ср., например, Круг, Основы электротехники, 1932 г., стр. 259.

в случае реактивного двигателя механическую работу. Следует отметить, что причины, вызывающие появление активной составляющей, в обоих случаях различны. Так, в реактивном двигателе для получения активной составляющей необходимо сдвинуть выступы ротора относительно магнитного потока, в то время как при явлении гистерезиса активная составляющая определяется задерживающим свойством железа (ток сдвигается относительно потока на угол магнитного запаздывания). Очевидно, что в реальном двигателе будут иметь место потери на гистерезис, благодаря которым возникнет активная составляющая намагничивающего тока. При нагрузке двигателя и сдвиге ротора на угол θ появится активная составляющая за счет сдвигания по фазе кривой x относительно кривой Φ . Эта активная составляющая обусловит механическую работу двигателя.

На рис. 114а, изображены те же кривые, что и на рис. 114б, но для случая работы реактивной машины в режиме генератора. Так как здесь момент прикладывается в сторону вращения машины, кривая реактивного сопротивления x сдвигается также в сторону вращения, благодаря

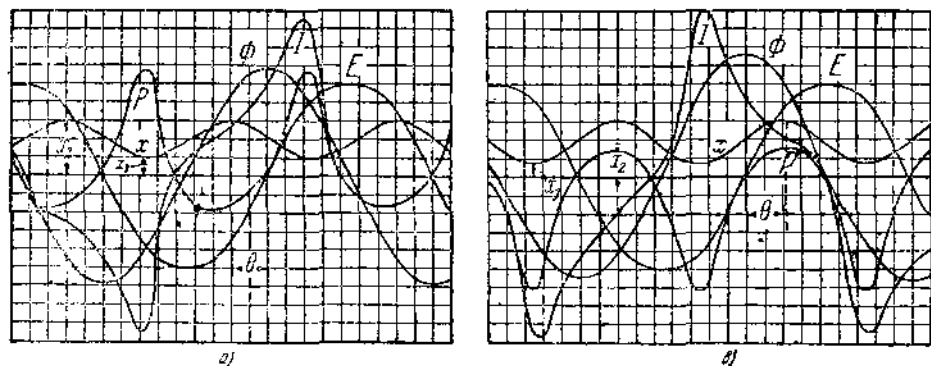


Рис. 114.

чему максимум кривой x будет теперь опережать максимум или ось потока на угол θ . Благодаря сдвигу кривой x кривая тока I сдвинется по фазе относительно кривой потока Φ , но только в сторону отставания (в двигателе мы имели сдвиг в сторону опережения). Угол между током и э. д. с. E теперь оказывается меньше 90° , благодаря чему получается генераторный режим (ток можно разложить на активную и реактивную составляющие). Если произвести умножение ординат кривой тока на соответствующие ординаты кривой э. д. с. $E = I_R (x_2 - x_1)$, то получим кривую мощности P . Площадь, ограниченная кривой выше оси абсцисс, теперь оказывается больше площади, расположенной ниже оси абсцисс. Следовательно, машина отдает положительную мощность, т. е. работает как генератор.

Из рис. 114а, видно, что реактивная составляющая I_R тока опережает активную составляющую I_a , а не отстает от нее, как это имело место при работе машины в режиме двигателя.

Это может иметь место лишь при наличии емкостной нагрузки в цепи генератора. Следовательно, здесь мы получаем графическое подтверждение указанному выше обстоятельству, что при $x_2 > x_1$ для осуществления генераторного режима реактивной машины необходимо в ее цепи иметь емкостную нагрузку, которая сдвигает реактивный ток генератора в сторону

опережения активного тока. Таким образом, сдвиг полюсных выступов ротора реактивной машины в сторону отставания или опережения от оси потока вызывает искажение последнего, что в электрической цепи машины обуславливает появление активной составляющей тока, создающей поперечный поток, взаимодействующий с неизменным продольным потоком, создающим э. д. с. машины и вызываемым реактивным током (отстающим в случае двигателя и опережающим в случае генератора). Следует подчеркнуть, что при неизменности напряжения сети и частоты намагничивающий (продольный) поток Φ должен остаться примерно неизменным, что и имеет место на рис. 114.

Из изложенного ясно, что мощность, развиваемая реактивным двигателем, зависит от величины разности реактивных сопротивлений ($x_2 - x_3$), определяемой конструкцией полюсных выступов ротора. Кроме того, существенную роль для синхронной передачи играет форма кривой реактивного сопротивления x (см. рис. 114). Желательно, чтобы максимум вращающего момента наступал не при $\theta = 45^\circ$ электрическим градусам, а при возможно меньшем значении угла, что требует такой конструкции полюсных наконечников, которая давала бы не пологую кривую в месте максимума значения x , а более заостренную. Тогда небольшие значения угла θ будут вызывать значительные сдвиги по фазе тока относительно потока, что повысит точность передачи. О последнем требовании уже упоминалось при рассмотрении выражения статического момента реактивного двигателя, причем отмечалось, что форма полюсных наконечников должна отвечать наибольшей интенсивности изменения магнитной проводимости при отклонении ротора от положения совпадения осей (см. § 93 и рис. 111).

Из приведенного выше вытекает, что в работе реактивной машины могут быть два существенных режима: $I = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$ при переменном угле θ и данной частоте. Первый режим в основном имеет место при неподвижном роторе и питании статора током нулевой частоты. Вторым режимом, наоборот, возникает при вращении ротора и питании статора переменным током с приложенным напряжением $U = \text{const}$ (для данной скорости), которое обусловит примерно постоянство потока. В случае $I = \text{const}$ максимальный момент, развиваемый двигателем, пропорционален разности магнитных продольной и поперечной проводимостей:

$$M_{i \max} = c_i (\lambda_g - \lambda_q) = c_i \lambda_q (k - 1). \quad (93)$$

В случае же $\Phi = \text{const}$ максимальный момент пропорционален разности магнитных сопротивлений:

$$M_{\Phi \max} = c_{\Phi} \left(\frac{1}{\lambda_q} - \frac{1}{\lambda_g} \right) = c_{\Phi} \frac{(k-1)}{\lambda_g} = c_{\Phi'} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_g} \right) \quad (94)$$

(величины магнитных проводимостей обуславливают величины реактивных сопротивлений x_q и x_g).

Из этих выражений вытекает, что при определенном значении $k = \frac{\lambda_g}{\lambda_q}$ выгодно, чтобы при $I = \text{const}$ абсолютные значения продольной и поперечной проводимости были возможно больше, а при $\Phi = \text{const}$ (т. е. при $U = f$ и $f \neq 0$ — возможно меньше).

¹ Обоснование этого выражения — см. далее, § 109.

108. Диаграммы напряжения реактивной машины. Диаграммы напряжения реактивной машины получаются из диаграммы ВАС для синхронной машины с явно выраженными полюсами, если э. д. с. E машины сделать равной нулю, что соответствует размыканию цепи возбуждения. Таким образом указанные диаграммы представляют собой частный случай диаграммы ВАС.

На рис. 115а, изображена диаграмма напряжений для реактивной машины, находящейся в режиме двигателя, на рис. 115,б — в режиме генератора. Приложенное напряжение U (рис. 115,а) должно иметь в себе три составляющих, компенсирующих активное падение напряжения Ia , реактивное падение напряжения от активной составляющей тока $Ia x_3$ и реактивное падение напряжения от реактивной составляющей тока $I_R x_2$. (Разложение реактивного падения напряжения произведено аналогично диаграмме на рис. 109б, причем $x_2 = x_g + x_s$ и $x_3 = x_g + x_s$ являются полными реактивными сопротивлениями для активного и реактивного токов). Ток I_a вызывает э. д. с.

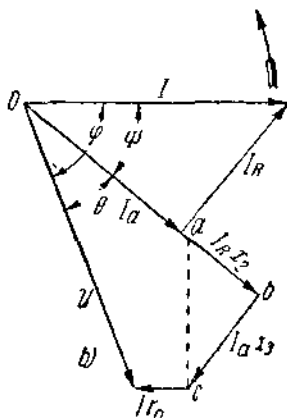
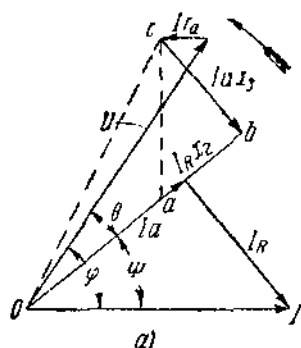


Рис. 115.

ром, опущенным из начала c вектора $Ia x_3$ на вектор тока I . Одна из указанных частей — часть $ab = I_R x_3$ представляет собой реакцию от тока I_R в случае неизменной реакции якоря (машина с неявно выраженными полюсами), равной x_3 . Вторая часть вектора $I_R x_2$ равна $I_R (x_2 - x_3)$ и является по существу обратной э. д. с. реактивного двигателя, которая обуславливает собой наличие электромагнитной мощности, передаваемой со статора на ротор. Если бы x_2 равнялось x_3 , то угол ψ оказался бы равным 90° , а $Ia x_3 = 0$, т. е. остался бы один реактивный ток I_R и машина не развивала бы никакой мощности. Из сети поступала бы лишь мощность на покрытие потерь Iz_c . При $(x_2 \neq x_3)$ мощность, передаваемая со статора на ротор, определится как произведение $P_a = Ia I_R (x_2 - x_3)$. Следует отметить, что в выражение для P_a должна входить именно величина $I_R (x_2 - x_3)$, а не вся величина $I_R x_2$, потому, что вектор ac , являющийся геометрической суммой векторов $Ia x_3$ и $I_R x_3$, перпендикулярен вектору тока I .

Благодаря наличию большого намагничивающего тока I_R , ток двигателя сдвинут по фазе относительно напряжения U на значительный угол φ в сторону отставания.

На рис 115,б представлена диаграмма напряжения для реактивной машины в режиме генератора, который может быть применен при параллельной работе с сетью и наличии в сети емкостной нагрузки. Ток I такого генератора имеет две составляющие: активную I_a и опережающую реактивную I_R . Последняя создает продольное поле, индуктирующее э. д. с. $I_R x_2$, а первая поперечное поле, вызывающее э. д. с. $I_a x_3$. Э. д. с. генератора $I_a (x_2 - x_3)$, обуславливающая его мощность, совпадает по направлению с активным током I_a , что дает генераторный режим. Таким образом, и из диаграммы мы получим подтверждение приводившемуся выше положению, что при $x_2 > x_3$ реактивная машина в режиме двигателя работает при отстающем токе, а в режиме генератора — при опережающем. В обоих случаях коэффициент мощности имеет небольшую величину.

109. Выражения для мощности и момента реактивной машины. Выше было установлено, что мощность в реактивной машине возникает в результате изменения реактивного сопротивления x , что обуславливается наличием полюсных выступов ротора. Реактивное сопротивление меняется с двойной частотой по сравнению с частотой питающего тока (см. рис. 113 и 114), причем форма кривой изменения x зависит от формы и размеров полюсных выступов.

Для простоты предположим, что изменение x происходит по синусоиде. Тогда величину x можно представить следующим образом:

$$x = \frac{1}{2} (x_2 + x_3) - \frac{1}{2} (x_2 - x_3) \cos 2\omega t, \quad (95)$$

где ω — угловая скорость, соответствующая частоте питающего тока.

При $t = 0$ имеем

$$x = \frac{1}{2} (x_2 + x_3) - \frac{1}{2} (x_2 - x_3) = x_{\min}.$$

Можем представить приведенное выражение в следующем виде:

$$x = \frac{1}{2} (x_2 + x_3) (1 - \gamma \cos 2\omega t) = x_{cp} (1 - \gamma \cos 2\omega t), \quad (96)$$

где

$$x_{cp} = \frac{1}{2} (x_2 + x_3), \text{ а } \gamma = \frac{x_2 - x_3}{x_2 + x_3}. \quad (97)$$

Выражение (95) для x имеет два члена — один постоянный (x_{cp}) и второй переменный. Амплитуда кривой, выраженной последним, равна $\frac{1}{2} (x_2 - x_3)$.

Ее отношение к x_{cp} равно величине γ . Эта величина в зависимости от соотношения x_2 и x_3 может колебаться в пределах $1 > \gamma > 0$. При $x_2 = x_3$ $\gamma = 0$. Наибольшее ее значение ($\gamma = 1$) наступает при $x_3 = 0$, как это вытекает из общего выражения для γ (принято, что x_2 всего больше x_3). Очевидно, что при $\gamma = 0$ и вращающий момент реактивной машины также равен нулю. Следовательно, величина последнего непосредственно связана с величиной γ . Другой величиной, которая должна войти в выражения для мощности и момента, является угол θ , представляющий собой угол сдвига оси выступов ротора и оси потока. Так, при $\gamma \neq 0$ и $\theta = 0$ величина момента M равна нулю, что следует из рассмотрения рис. 113.

Ранее указывалось, что при повороте ротора на некоторый угол момент, развиваемый силами поля, пропорционален разности магнитных проводимо-

стей в исходном и конечном положениях, если при этом не изменяется сила тока, и пропорционален разности магнитных сопротивлений, если остается постоянным поток.

Иначе можно сказать, что э. м. с., т. е. механическая сила, возникающая в системе вследствие происходящих в ней электромагнитных процессов, выражается как частная производная от электрокинетической энергии системы по геометрической координате.¹

Электрокинетическая энергия системы в общем виде может быть выражена $A = \frac{1}{2} Li^2$, где L — коэффициент самоиндукции системы, равный в общем виде

$$L = \frac{4\pi \mu S}{l_s} \omega^2. \quad (98)$$

В данном случае коэффициент самоиндукции машины является величиной переменной, так же как и реактивное сопротивление.

Если обратиться к рис. 113 и 114, то можно констатировать, что при определенном угле θ кривые x и Φ будут между собой неподвижны. С изменением угла θ кривая x начнет двигаться относительно кривой Φ , причем изменение реактивного сопротивления для потока окажется пропорциональным $\sin 2\theta$, так как величина x изменяется с двойной частотой по сравнению с частотой питающего тока.

Следовательно, можно написать для значения изменения x' относительно Φ :

$$x' = \frac{1}{2} (x_2 - x_3) \sin 2\theta = x_{cp} \gamma \sin 2\theta.$$

Соответственно для изменения коэффициента самоиндукции получим:

$$l \gamma \sin 2\theta, \quad (99)$$

где l — среднее значение коэффициента самоиндукции (аналогично x_{cp}).

Зная, что мощность и момент пропорциональны изменению электрокинетической энергии системы, можно написать для момента двигателя:

$$M = -\frac{l l^2}{2} \gamma \sin 2\theta. \quad (100)$$

Соответственно для электромагнитной мощности двигателя будем иметь:

$$P_a = M\omega = -\pi f l l^2 \gamma \sin 2\theta. \quad (101)$$

Если машина работает с отстающим током, т. е. $\theta > 0$, значение мощности получается со знаком минус (режим двигателя); при опережающем токе знак у P_a положителен (режим генератора).

Мощность P_a оказывается максимальной при данном значении тока I , когда $\sin 2\theta = 1$, т. е. $\theta = 45^\circ$, что уже отмечалось при рассмотрении картины распределения магнитных линий в реактивной машине (см. § 105). Величины l и γ могут быть выражены через параметры машины, что позволит определить мощность реактивной машины по ее нормальным расчетным данным. Так для многофазной реактивной машины Brüderlin² приводит формулу, являющуюся практической модификацией установленного выше в общем виде выражения для P_a :

$$P_a = \frac{16}{\pi} f \frac{l_1 \tau}{p\delta} m^2 \omega^2 k_w^2 I^2 \sin \alpha \pi \sin 2\theta. 10^{-12} \text{ kW}. \quad (102)$$

¹ См. В. Ф. Миткевич, Физические основы электротехники, 1932 г., § 107.

² R. Brüderlin, Der Drehschub der allgemeinen Reaktionsmaschine, E. u. M., Heft 37, 1924, S. 553—558.

Здесь I — ток в фазе; w — число витков в фазе; m — число фаз; k_w — коэффициент обмотки; p — число пар полюсов; δ — длина междужелезного пространства; τ — полюсное деление; l_1 — активная длина железа якоря; $\alpha = \frac{b}{\tau}$ — отношение полюсной дуги к полюсному делению.

При выводе формулы пренебрегалось магнитным сопротивлением железа и вместе с тем железными потерями и предполагалось радиальное направление силовых линий.

Приведенные выше формулы относятся к случаю работы машины при определенном значении силы тока.

Основным режимом работы является работа при определенном напряжении. Поэтому более существенны выражения для мощности в функции от приложенного напряжения.

Выражая значение потока $\Phi = \frac{L i}{w}$ через приведенные выше значения L и i , а затем находя величину э. д. с. из известного выражения $e = -w \frac{d\Phi}{dt}$ и далее, определяя эффективное значение э. д. с. машины E , получим:

$$E = 2\pi f l I \sqrt{\left(1 - \frac{\gamma}{2}\right)^2 \cos^2 \theta + \left(1 + \frac{\gamma}{2}\right)^2 \sin^2 \theta} = \\ = 2\pi f l I \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4} - \gamma \cos 2\theta}, \quad (103)$$

где I — действующее значение тока.

Отсюда кажущаяся мощность в вольтамперах на одну фазу:

$$P_a \text{ (VA)} = I E = 2\pi f l I^2 \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4} - \gamma \cos 2\theta}. \quad (104)$$

Подставляя значение I , выраженное через E , будем иметь

$$P_a \text{ (VA)} = \frac{E^2}{2\pi f l \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4} - \gamma \cos 2\theta}}. \quad (105)$$

Беря отношение мощностей P_a и $P_a \text{ (VA)}$ из выражений (101) и (104), получим выражение для коэффициента мощности

$$\cos \psi = \frac{P_a}{P_a \text{ (VA)}} = \frac{\gamma \sin 2\theta}{2 \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4} - \gamma \cos 2\theta}}. \quad (106)$$

Окончательно для P_a получим

$$P_a = P_a \text{ (VA)} \cos \psi = \frac{E^2 \gamma \sin 2\theta}{4\pi f l \left(1 + \frac{\gamma^2}{4} - \gamma \cos 2\theta\right)}. \quad (107)$$

Максимальное значение коэффициента мощности получается при

$$\frac{d \cos \psi}{d \theta} = 0,$$

чему соответствует

$$\cos 2\theta = \frac{\gamma}{2}.$$

Из выражения для P_a (101) при данном токе I видно, что значение P_a оказывается максимальным при $\sin 2\theta = 1$, т. е. при $\theta = 45^\circ$, что уже отмечалось при рассмотрении картины распределения магнитных линий (рис. 110).

Если имеет место постоянство приложенного напряжения $U \approx E$ [выражение (105)], то максимум мощности наступает при

$$\cos 2\theta = \frac{\pm \gamma}{1 + \frac{\gamma^2}{4}}. \quad (108)$$

На рис. 116 представлены кривые мощности P_a , коэффициента мощности $\cos \phi$ и тока I в зависимости от угла θ для реактивной машины со следующими постоянными:

$$E = 110 \text{ В}; x = 3 \Omega \text{ и } \gamma = 0,8.$$

В данном частном случае общие формулы примут вид:

$$I = \frac{41}{\sqrt{1,45 - \cos 2\theta}};$$

$$E_a = -\frac{2017 \cdot \sin 2\theta}{1,45 - \cos 2\theta};$$

$$\cos \phi = \frac{0,447 \cdot \sin \theta}{\sqrt{1,45 - \cos 2\theta}}.$$

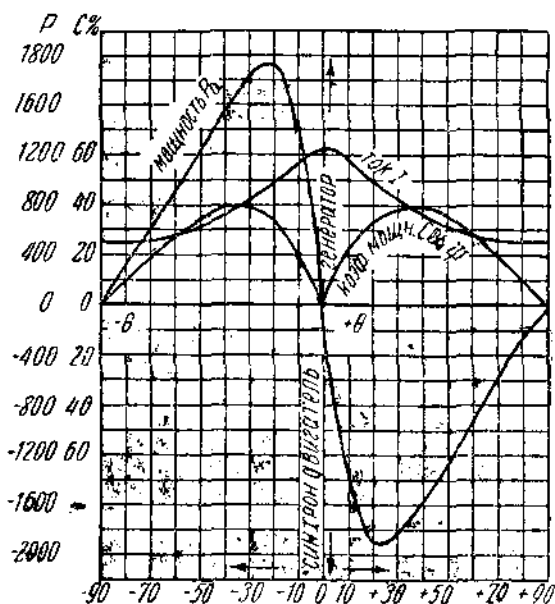


Рис. 116.

превышает 40% . Максимумы коэффициента мощности и мощности P_a не совпадают, как это видно из кривых рис. 116. Кривая P_a в соответствующем масштабе представляет собой и кривую M .

Для практических расчетов мощности многофазной реактивной машины по ее расчетным данным при $E = \text{const}$ Брюерлином предложена довольно простая формула.

Индукция B для поля реактивной машины может быть выражена следующим уравнением:

$$B = 4 \frac{1}{\delta} \tau K \cos \left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{\tau} x \right) \cdot 10^{-9}, \quad (109)$$

где

$$K = \frac{\sqrt{2} m \omega k_w I}{p\tau}.$$

I — максимальное значение линейной нагрузки машины, а τ — полюсное деление.

Это выражение вытекает из того положения, что распределение линейной нагрузки при синусоидальном m -фазном токе происходит тоже по синусоиде

$$k = K \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\tau} x \right),$$

причем T — время, соответствующее периоду изменения тока относительно вторичной части. При покое первичной и вторичной частей друг относительно друга T равно периоду питающего тока. При синхронном вращении вторичной части с полем статора величина T бесконечно велика. Величина x представляет собой координату по окружности машины. Таким образом изменяющаяся, благодаря явно выраженным полюсам, величина между железного пространства δ может быть выражена как функция x , т. е. $\delta = f(x)$.

Величину B можно разложить на продольную и поперечную составляющие: ¹

$$B = 4 \frac{1}{\delta} \tau K \cos \theta \cos \frac{\pi}{\tau} x \cdot 10^{-9} + \\ + 0,4 \frac{1}{\delta} \tau K \sin \theta \sin \frac{\pi}{\tau} x \cdot 10^{-9} = B_q + B_g. \quad (110)$$

Возьмем от обеих составляющих лишь основную гармонику, для чего нужно (на основании анализа гармонических) умножить амплитуды указанных составляющих на коэффициенты поперечного и продольного полей c_q и c_g , равные:

$$c_q = \frac{1}{\pi} (\alpha \pi - \sin \alpha \pi) \quad (111)$$

и

$$c_g = \frac{1}{\pi} (\alpha \pi + \sin \alpha \pi), \quad (112)$$

где $\alpha = \frac{b}{\tau}$ есть отношение полюсной дуги к полюсному делению.

Обе составляющие находятся в квадратуре и поэтому выражение для результирующей основной волны поля будет иметь вид:

$$B_1 = 4 \frac{1}{\delta} \tau K \sqrt{\cos^2 \theta c_q^2 + \sin^2 \theta c_g^2} \cdot 10^{-9} = 4 \frac{1}{\delta} \tau K c_0 \cdot 10^{-9}, \quad (113)$$

где

$$c_0 = \sqrt{\cos^2 \theta c_q^2 + \sin^2 \theta c_g^2}. \quad (114)$$

Для практических расчетов может быть применена формула

$$B_1 = 0,566 \frac{c_0}{p\delta} m w k_w I \text{ гауссов}, \quad (115)$$

причем δ — в сантиметрах, I — в амперах.

Электродвижущая сила на фазу, индуцируемая основной гармоникой потока

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \tau l_1 B_1,$$

¹ Bröderlin, Der Drehschub der allgemeinen Reaktionsmaschine, E. u. M., Heft 37, 1924, S. 553—558.

равна

$$E = \frac{2\pi}{V^2} f \omega k_w \Phi_1. \quad (116)$$

Принимая во внимание выражение для линейной нагрузки K , можно написать:

$$E = x c_0 I, \quad (117)$$

где величина реактивного сопротивления x имеет вид

$$x = 16 \text{ мф} \frac{l_i}{p\delta} \omega^2 k_w \cdot 10^{-9} \Omega \quad (118)$$

(f — в герцах; l_i , τ , δ — в сантиметрах).

Следует заметить, что приведенная величина x соответствует ее значению при равномерном междужелезном пространстве. Для учета явно выраженных полюсов служит коэффициент c_0 .

Из уравнений (113), (116) и (118), полагая, что э. д. с. $E \approx U$ (где U — напряжение на фазу), получим выражение для P_a при постоянном приложенном напряжении

$$P_a = \frac{p\delta}{16\pi f l_i \tau \omega^2 k_w^2} U^2 \frac{\sin \alpha \pi \sin 2\theta}{c_0^2} 10^{-6} \text{ kW} \quad (119)$$

или также можно написать

$$P_a = m \frac{U^2}{2} \frac{2}{\pi} \frac{\sin \alpha \pi \sin 2\theta}{x c_0^2} \cdot 10^{-6} \text{ kW}. \quad (120)$$

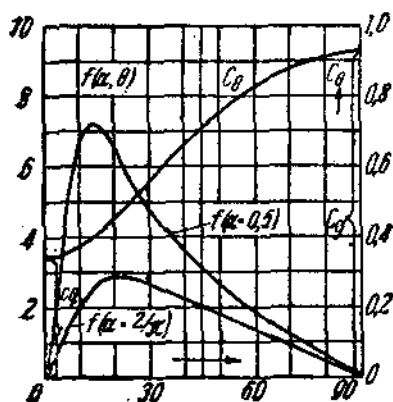


Рис. 117.

На рис. 117 в зависимости от угла θ представлены: кривая c_0 для значения $\alpha = \frac{2}{\pi}$ и кривые выражения

$$\frac{\sin \alpha \pi \sin 2\theta}{c_0^2} \text{ для } \alpha = \frac{2}{\pi} \text{ и } \alpha = 0,5.$$

Следует опять-таки подчеркнуть, что максимальная мощность машины наступает в случае $U = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$ при других значениях угла θ , чем при $I = \text{const}$. В последнем случае $P_{a \max}$ соответствует $\theta = 45^\circ$.

Из уравнения (120) можно получить, что наибольшая мощность при заданном напряжении будет иметь место, когда

$$\tan \theta = \frac{c_q}{c_g}.$$

Тогда выражение $P_{a \max}$ примет вид:

$$P_{a \max} = m \frac{U^2}{2} \cdot \frac{1}{x} \cdot \left(\frac{1}{c_q} - \frac{1}{c_g} \right) = m \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_g} \right). \quad (121)$$

От последнего выражения можно перейти к общему выражению для P_a .

Коэффициент мощности $\cos \psi$ определится из уравнений (102), (117) и (118) следующим образом:

$$\cos \psi = \frac{P_a}{m x c_0 I^2} = \frac{1}{\pi} \frac{\sin \alpha \pi \sin 2\theta}{c_0}. \quad (122)$$

110. Область применения трехфазного реактивного двигателя. На основании разобранных выше материала по реактивной машине следует констатировать, что последняя может применяться в схемах синхронной связи лишь в качестве двигателей небольшой мощности благодаря низкому коэффициенту мощности, который не превышает значения $\cos \psi = 0,5$. Кроме того, благодаря отсутствию возбуждения на роторе, развиваемый двигателем момент оказывается менее, чем в синхронном двигателе, тех же габаритов, но с возбуждением на роторе.

Однако для небольших мощностей реактивный двигатель весьма удобен, так как требует всего трех проводников. Вместе с тем из рис. 116 видно, что максимальная мощность двигателя (и следовательно, максимальный момент) наступает при сравнительно небольших отклонениях оси полюсных выступов ротора от оси потока статора. Поэтому точность передачи с реактивными двигателями может быть получена достаточно высокая, так как рабочий момент берется значительно меньше, чем $M_{\max}$. При $I = \text{const}$ (статический момент двигателя) максимальное возможное отклонение (при синусоидально изменяющейся проводимости магнитному потоку) $\theta_{\max} = 45^\circ$, тогда как в двигателе с возбуждением $\theta_{\max} = 90^\circ$. Если же проводимость изменяется более резко, что достигается соответствующей конструкцией полюсных наконечников (см. рис. 111), то и нарастание в моменте идет весьма круто, повышая степень точности передачи.

Указанные причины и обусловили то обстоятельство, что реактивный двигатель нашел большее применение в специальных установках небольшой мощности для синхронизирования каких-либо перемещений или синхронного вращения осей (например регистрирующие приборы и т. п.) и вовсе не применяется как обычный приводной двигатель в промышленности.

111. Особенности работы однофазного реактивного двигателя. Хотя однофазный реактивный двигатель и не может быть применен в обычной схеме синхронной связи с частотой, меняющейся от нуля, однако надлежит вкратце на нем остановиться, так как он получил широкое распространение в различных схемах, где требуется строго синхронное число оборотов при небольшом моменте, в частности для синхронного вращения нескольких осей, механически между собой не связанных. В этом случае двигатели питаются от одной сети или нескольких сетей с одинаковыми частотами.

В § 95 отмечалось, что в основе действия всякой электрической машины лежат два условия: наличие двух пространственно сдвинутых систем ампервитков или двух источников м. д. с. и наличие коммутации в самом общем смысле этого слова.

Последнее условие в реактивном многофазном двигателе выражалось в виде вращающегося магнитного поля, ось которого была сдвинута на постоянный для данного момента угол ($\widehat{AW_S\Phi}$) относительно выступов ротора. Следовательно, здесь имеет место сохранение указанного угла, так как в многофазном двигателе поток, оставаясь постоянным по величине, меняет свое положение, увлекая за собой ротор. В однофазной машине поток имеет постоянное положение, но меняется по величине. Благодаря этому, при вращении ротора угол ($\widehat{AW_S\Phi}$) будет непрерывно меняться в зависимости от пространственного положения полюсных выступов ротора. Здесь коммутация будет проявляться в виде постоянного восстановления угла ($\widehat{AW_S\Phi}$).

Действительно, если обратиться к однофазному двигателю, изображенному на рис. 112, то можно констатировать, что вращение ротора будет

осуществляться не постоянной силой, а периодическими импульсами, соответствующими максимуму потока.

При идеальном холостом ходе (без трения и каких-либо других потерь) в момент наступления в двигателе максимума потока ось последнего будет совпадать с осью полюсных выступов (положение, изображенное на рис. 112 сплошной линией). Ротор, втянутый в это положение (мы предполагаем, что двигатель уже приведен каким-либо образом в синхронное вращение), благодаря инерции будет продолжать свое вращение, причем поток станет уменьшаться. При повороте ротора на 90° из исходного положения поток окажется равным нулю, а ротор будет проходить по инерции через мертвое положение. Далее, поток начнет расти в обратном направлении, вытягивая перешедший мертвое положение ротор, который начнет под действием потока приобретать живую силу. Так будет продолжаться до совпадения оси ротора и потока (ротор окажется сдвинутым на 180° от исходного положения). После этого ротор начнет двигаться по инерции (следующие 90°), преодолевая вытягивающее действие уменьшающегося магнитного потока. Повернувшись на 90° , ротор вновь начнет запасать энергию и т. д. Таким образом работа однофазного двигателя происходит толчками, причем двигатель в течение каждого оборота будет частично работать в режиме двигателя (при вытягивании потоком ротора в положение совпадения осей) и частично в режиме генератора (при движении ротора по инерции против действия магнитного потока). В зависимости от того, какой из режимов преобладает, будет иметь место работа реактивной машины двигателем или генератором.

Из сказанного ясно, что момент однофазной реактивной машины в течение одного оборота меняется и по величине и по направлению, тогда как в трехфазной машине он остается неизменным за все время вращения ротора.

Если вал ротора реактивной машины окажется нагруженным некоторым тормозящим моментом, то ротор будет приходить в положение совпадения осей не при максимальном значении потока, а при уже несколько уменьшившемся. Это отставание ротора будет измеряться углом θ , на который ротор не дойдет к совпадению осей в тот момент, когда поток достигает максимума. Интересно отметить, что при таком запаздывании на угол θ режим двигателя начнет преобладать над режимом генератора, так как вытягивающее действие окажется сильнее благодаря тому, что при максимальном значении потока между ним и ротором будет оставаться угол θ , что позволяет ротору запасти большую живую силу, чем в случае идеального холостого хода, и работать более устойчиво. Кроме того, тормозящее действие генераторного режима будет ослаблено благодаря тому, что максимум потока по своему воздействию на ротор перейдет на сторону режима двигателя.

Таким образом ротор однофазного двигателя, вращаясь синхронно с частотой тока статора, в пределах одного оборота по указанным выше причинам будет иметь определенную неравномерность хода. Очевидно, что последняя уменьшается с увеличением инерции ротора. В известных же случаях подобная неравномерность хода может вызвать качания ротора.

Исходным условием для коммутации в однофазном реактивном двигателе можно считать форму кривой приложенного напряжения, определяющую собой и форму потока в машине.

Для уяснения сущности коммутации представим себе, что в те моменты движения ротора, когда он проходит область отрицательных вращающих

моментов, питание обмотки статора прерывается, чтобы устранить влияние отрицательных моментов. Такого рода включение и выключение тока в известные моменты и будет наиболее примитивной коммутацией. Вместо прерывания тока, вызывающего искрение, можно просто уменьшать его величину введением большого сопротивления. Наличие синусоидально изменяющегося потока по существу и является автоматической коммутацией. Уклонение от синусоидальной формы потока поэтому сильно сказывается на работе двигателя в положительную или отрицательную сторону. Так, при наличии третьей гармоники, вытягивающей кривую в высоту и срезающей ей бока, коммутация улучшается, т. е. увеличивается средний вращающий момент двигателя.

Существенная особенность коммутации однофазного реактивного двигателя заключается в наличии отрицательной площади у кривой мгновенных вращающих моментов. При идеальном холостом ходе положительная и отрицательная площади указанной кривой равны между собой.

Выражение для мгновенного вращающего момента двигателя при неизменном подведенном синусоидальном напряжении имеет вид: ¹

$$M_t = \frac{4 U^2 \sin^2 \omega t \sin 2\beta}{\omega^2 L_0 \varepsilon \sin 2\alpha (c - \cos^2 \beta)^2}, \quad (123)$$

где U — подведенное напряжение, $\omega = 2\pi f$ (f — частота питающего тока), β — угол поворота оси выступов ротора относительно оси обмотки статора, α — угол, соответствующий ширине полюса.

$$L_0 = 4\pi (k_w q_n s_n)^2 \cdot \frac{l_t \tau}{2\pi \delta}; \quad (124)$$

(здесь q_n — число впадин на полюс статора; s_n — число проводников во впадине; k_w — обмоточный коэффициент); $\varepsilon = 1 - \frac{\delta}{q}$; (q — расстояние от статора до ротора в промежутке между выступами ротора);

$$c = \frac{2\varepsilon\alpha + \pi(1-\varepsilon)}{\varepsilon \sin 2\alpha}. \quad (125)$$

¹ См. статью Тер-Маркарянца, Теоретическое и экспериментальное исследование синхронного реактивного двигателя. „Изв. Ленинградского политехнического института“, т. XXXI, 1928 г., стр. 130.

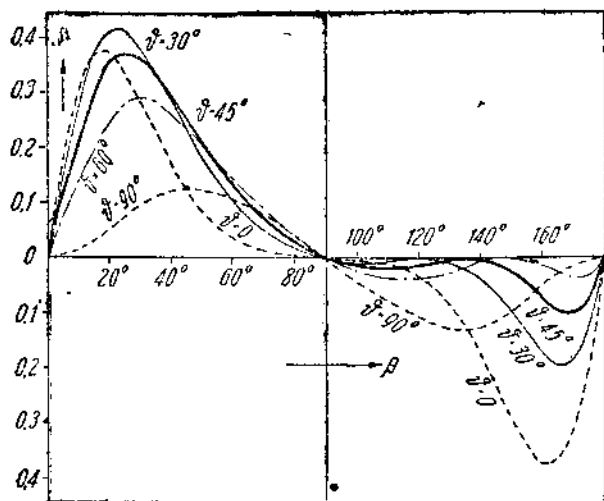


Рис. 118.

На рис. 118 представлены кривые вращающих моментов, имеющих место за один оборот ротора при различных углах θ (для однофазного двигателя они могут быть обозначены через θ). Кривые построены в функции угла θ , изменяющегося в пределах от 0 до 2π .

Из рассмотрения кривых видно, что за один оборот ротора имеют место как положительные, так и отрицательные моменты, причем в случае $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 90^\circ$ площади положительных и отрицательных моментов равны, что свидетельствует об отсутствии какого-либо среднего вращающего момента за оборот ротора, т. е. двигатель может вращаться лишь в условиях идеального холостого хода. При $\theta = 30^\circ$ имеем большую разницу между положительной и отрицательной площадями, благодаря чему двигатель будет вращаться устойчиво, развивая большой средний вращающий момент.

Кроме синхронной скорости однофазный реактивный двигатель в случае постоянного синусоидального потока, т. е. постоянного приложенного напряжения, может работать при различных дробных по отношению к синхронной скоростях ротора ($1/2$, $1/3$, $1/4$ синхронной скорости и т. д.). При несинусоидальной форме кривой приложенного напряжения двигатель может иметь большой добавочный комплект скоростей.¹

Если обозначить через s отношение полной синхронной скорости к различным ступеням скорости, развиваемой двигателем ($s = 1, 2, 3$ и т. д.), то выражения для среднего вращающего момента и мощности однофазного реактивного двигателя будут иметь вид:

$$M_{cp} = \frac{2s U^2 \sin 2s\theta}{\omega_0^2 L_0 \varepsilon \sin 2\alpha \sqrt{c^2 - 1} \cdot (c + \sqrt{c^2 - 1})^s} \quad (126)$$

$$P_a = \frac{2 U^2 \sin 2s\theta}{\omega L_0 \varepsilon \sin 2\alpha \sqrt{c^2 - 1} \cdot (c + \sqrt{c^2 - 1})^s} \quad (127)$$

(значение приведенных в формуле величин—см. выше).

Из формулы (126) вытекает, что максимум среднего вращающего момента наступает при $\theta = \frac{\pi}{4s}$. Следовательно, чем меньшую скорость развивает двигатель, тем уже границы возможного изменения угла. Для $s = 1, 2, 3$ и т. д. имеем соответственно для $\theta_{\max}$: $\frac{\pi}{4}$, $\frac{\pi}{8}$, $\frac{\pi}{12}$ и т. д.

С уменьшением скорости падает и мощность, развиваемая двигателем, причем тем сильнее, чем больше величина s .

Максимум вращающего момента снижается значительно медленнее.

Однофазный реактивный двигатель не имеет начального вращающего момента и при изменении частоты от нуля. Поэтому в точных схемах синхронной связи с переменной частотой он неприменим. Для пуска в ход при включении в сеть с нормальной частотой реактивный двигатель осуществляют по типу однофазных асинхронных двигателей, т. е. с короткозамкнутой обмоткой на роторе и пусковой обмоткой на статоре. Разница между указанными двигателями заключается лишь в наличии в реактивном двигателе на роторе полюсных выступов. При весьма малой мощности

¹ Интересующихся этим вопросом отсылаем к статье Е. А. Тер-Маркарянца, Теоретическое и экспериментальное исследование синхронного реактивного двигателя. Изв. Ленинградского политехнического ин-та, т. XXXI, 1928 г., стр. 121.

реактивный двигатель пускается просто от руки. Коэффициент мощности однофазного реактивного двигателя не может превышать 0,5, что следует из выражения его максимального значения в зависимости от угла θ :¹

$$\cos \phi_{\max} = -\frac{\sin 4\theta}{2}. \quad (128)$$

112. Влияние на вращающий момент некоторых размеров реактивной машины. Интересно отметить влияние на величину вращающего момента реактивной машины факторов: δ (междужелезное пространство), q (расстояние по радиусу от статора до ротора в промежутках между выступами последнего), α (угол, соответствующий полюсной дуге выступов ротора).

Увеличение δ вообще вызывает уменьшение вращающего момента, так как уменьшается продольная проводимость, что снижает момент, как это явствует из приведенных в § 107 соотношений (93) и (94). Однако, в некоторых случаях увеличение δ отражается значительно и на поперечной проводимости и поэтому может привести в случае $U = \text{const}$ к увеличению момента. Для случая же $I = \text{const}$ наименьший воздушный зазор δ всегда является наиболее выгодным, что вытекает из рассмотрения формулы (93) для M .

Ширина полюсной дуги оказывает большое влияние на величину M , так как обуславливает разность продольной и поперечной проводимостей.

Следует отметить, что при задан-

ном значении $\frac{\lambda_g}{\lambda_q}$ выгодно, как это видно из формул (93) и (94), чтобы абсолютные значения продольной и поперечной проводимостей в случае режима работы при $I = \text{const}$ были возможно больше, а в случае $U = \text{const}$ возможно меньше.

На рис. 119 представлены кривые изменения максимального значения момента $M_{\max}$ при различных значениях ширины полюса α в зависимости от величины δ , выраженной как часть от размера q .

При одном и том же δ (в известных пределах его относительных значений) уменьшение полюсной дуги вызывает увеличение максимального вращающего момента. Если же величина δ составляет довольно значительную часть от размера q , что может быть или при большом абсолютном значении δ или при малом q , то максимальный момент вообще снижается, причем на его величину размеры полюса не оказывают очень значительного влияния. В этом случае машина начинает по своей конструкции, а следовательно и свойствам, приближаться к машине без выступов на роторе, т. е. теряет свои свойства как синхронная.

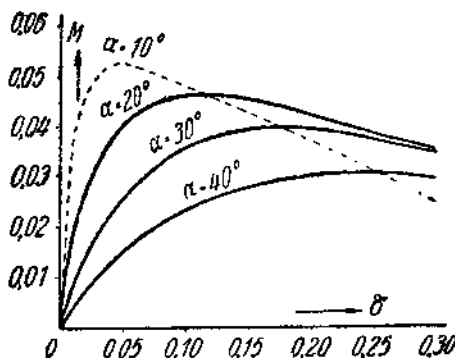


Рис. 119.

¹ См. статью Тер-Маркьянца, «Изв. Ленинградского политехнического института», 1928 г., стр. 146.

113. Колесо Лакура. Наиболее простым и вместе с тем довольно часто применяющимся однофазным реактивным двигателем (в телевизии, телеграфии, сигнализации и т. п.) является так называемое колесо Лакура, представляющее собой своеобразную разновидность реактивного двигателя.

Колесо состоит (рис. 120) из питаемого однофазным током двухполюсного статора S и ротора R без обмотки с большим числом полюсных выступов $2p$ (в данном случае шесть). Во взаимодействии с полем статора выступы ротора последовательно сменяют друг друга. Поэтому полюсным шагом τ машины надлежит считать полюсный шаг ротора (расстояние по окружности от середины одного выступа до середины соседнего). Следовательно, подобный двухполюсный двигатель в коммутационном отношении эквивалентен $2p$ -полюсному двигателю, если ротор при двухполюсном статоре имеет $2p$ выступов. В соответствии с этим полная синхронная скорость вращения колеса Лакура равна $n = \frac{60f}{p}$, где p — число пар выступов на роторе при двух полюсах на статоре.

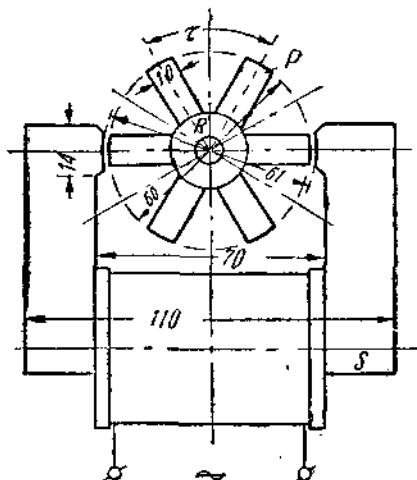


Рис. 120.

(1÷10 W) и служат для приведения во вращение весьма маломощных механизмов. Колесо Лакура применяют также для синхронизирования вращения малых двигателей (серводвигателей) постоянного тока. На рис. 120 представлено колесо Лакура, изготовляемое французской фирмой Sagantier, и приведены его основные размеры в миллиметрах.

Параметры подобного двигателя имеют примерно следующие значения: активное сопротивление $R = 2,5 \Omega$, реактивное продольное сопротивление $x_2 = 105 \Omega$, реактивное поперечное сопротивление $x_3 = 62 \Omega$. Следовательно, $\frac{x_2}{x_3} \approx 1,7$. Для

определения величин x_2 и x_3 надлежит производить измерения при установке ротора в двух крайних положениях: наибольшей и наименьшей проводимости. Двигатель дает около 8 W при напряжении в 120 V и токе статора 1,4 A. Статор и ротор двигателя собраны из листового железа. Пускается колесо Лакура в ход непосредственно от руки. Следует отметить, что равномерная работа двигателя имеет место при достаточно большом угле θ (см. § 111). Поэтому для каждой нагрузки нужно подбирать такое напряжение, которое обусловило бы угол θ , дающий устойчивую работу двигателя. Увеличение напряжения выше этого значения при той же нагрузке повлечет за собой неравномерность хода и затем выпадение из синхронизма.

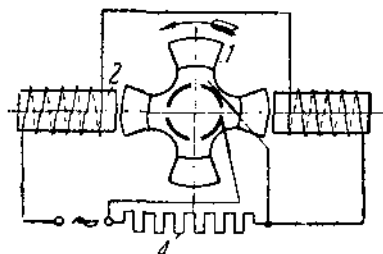


Рис. 121.

Для ослабления качаний колеса Лакура и неравномерности его хода, а также для увеличения развиваемого им момента, германская фирма *Wahleider*¹ предлагает насаживать на вал ротора (рис. 121) переключатель коллекторного типа с четырьмя пластинами, на котором установлены на небольшом расстоянии друг от друга две щетки, соединенные с концами активного сопротивления 4, включенного последовательно в цепь обмотки статора. Назначение указанного приспособления — уменьшать отрицательный (генераторный) момент однофазного двигателя, возникающий после прохождения выступами ротора 1 полюсных выступов статора 2. При подходе выступов ротора к последним имеет место двигательный (положительный) момент. В это время щетки находятся на одной пластине, замыкая накоротко сопротивление 4 и тем самым подводя полное напряжение сети к обмотке двигателя. После того как ось выступов ротора пройдет ось выступов статора, возникнет тормозящий момент причем щетки окажутся на различных пластинах переключателя 3, благодаря чему сопротивление 4 включится в цепь обмотки статора, уменьшая величину подведенного к ней напряжения и тем самым величину тормозящего движение потока. Далее, при возникновении положительного момента сопротивление вновь будет замкнуто накоротко щетками, и т. д.

ГЛАВА XIX.

РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЭЛАСТИЧНОЙ СВЯЗЬЮ С ОСЬЮ.

114. Введение. Установки синхронной связи различной мощности с различными типами источников — ключей переменной частоты обуславливают необходимость применения различных же по конструкции и мощности синхронных двигателей, особенности устройства которых зависят, кроме того, от желательной точности работы и скорости передачи. Так, в зависимости от величины мощности могут применяться синхронные двигатели с возбуждением на роторе или же реактивные двигатели. Синхронные двигатели с возбуждением обладают тем недостатком, что необходим источник постоянного тока. В некоторых конструкциях этот недостаток устраняется тем, что применяются синхронные двигатели с возбуждением или переменным током от главной цепи (индукционный двигатель двойного питания) или же с возбуждением выпрямленным током. Конструкция реактивных двигателей также довольно разнообразна, что стоит в связи с общим устройством различных схем синхронной связи.

В настоящей главе попутно будут также приведены некоторые, наиболее характерные конструкции синхронных двигателей, не применяемых непосредственно в схемах синхронной связи с переменной частотой, но получающих распространение в различных устройствах, где требуется достижение строго синхронного вращения одной или нескольких осей.

Подобный случай по существу является частным случаем схемы синхронной связи, так как представляет собой работу двигателя от ключа — источника с неизменной частотой.

¹ Герм. патент № 416615 от 1925 г.

Кроме того рассмотрение таких двигателей является существенным, поскольку в дальнейшем будет разобран вопрос о синхронном вращении электрических двигателей различных типов.

115. Двигатель фирмы Сперри. Этот двигатель принадлежит к типу реактивных синхронных двигателей с вращающимся полем и представляет собой так называемый импульсный двигатель.

Ротор R двигателя (рис. 122) имеет два полюсных выступа с полюсными наконечниками, выполненным с расчетом получения наибольшего значения $\frac{d\lambda}{d\theta}$, т. е. с насыщенными краями (примерно как это изображено на рис. 111, а). Статор двигателя имеет три пары явно выраженных полюсов, поочередно включаемых в цепь постоянного тока при помощи особого коллектора-переключателя. При включении какой-либо пары диаметрально расположенных полюсов (например 1—1) ротор ориентируется относительно их так, что для потока получается путь наибольшей проводимости.

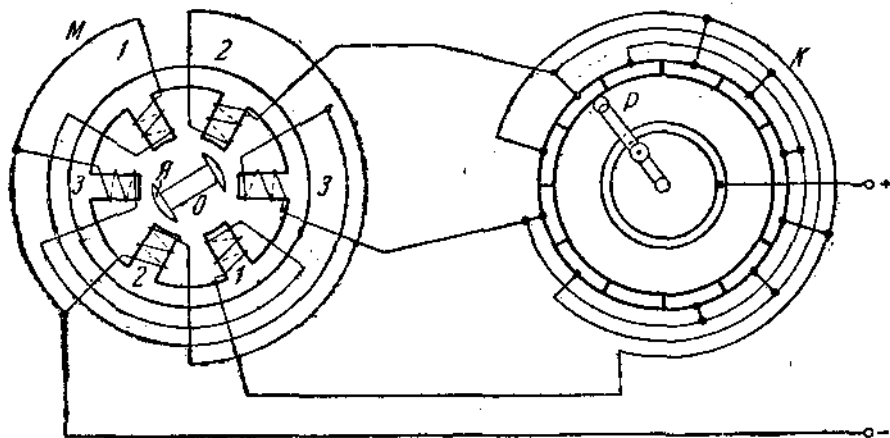


Рис. 122.

В соответствии с тормозящим моментом на валу двигателя оси ротора и данной пары полюсов будут сдвинуты на некоторый угол θ в сторону действия тормозящего момента. Далее, сообразно передвижению ролика P ключа K по неподвижному коллектору, включается следующая пара полюсов, например 2—2. Тогда ротор займет новое положение против полюсов 2—2. При переходе ролика с одной пластины на другую одновременно окажутся включенными две соседних пары полюсов и ротор поэтому передвинется в среднее положение между полюсами. Таким образом полюса включаются в такой последовательности:

$$1-1 \left\langle \begin{matrix} 1-1 \\ 2-2 \end{matrix} \right\rangle 2-2 \left\langle \begin{matrix} 2-2 \\ 3-3 \end{matrix} \right\rangle 3-3 \left\langle \begin{matrix} 3-3 \\ 1-1 \end{matrix} \right\rangle 1-1$$

Следовательно, ротор передвигается скачками через 30° .

Однако промежуточные положения устойчивыми считать нельзя и потому можно сказать, что ротор за один оборот имеет шесть устойчивых положений (через 60°).

Первое условие работы всякого двигателя (наличие $AW_{\Sigma\Phi}$) осуществляется здесь, как и во всяком реактивном двигателе, за счет возникновения поперечного поля, взаимодействующего с продольным (искажение потока при возникновении угла θ благодаря явновыраженным полюсам). Второе условие — коммутация — создается весьма примитивным способом, а именно переключением при помощи ключа полюсов статора. Указанное переключение вызывает подобие вращающегося поля, увлекающего за собой ротор. Поток полюса при включении и выключении пульсирует по величине. Поэтому двигатель Сперри можно сравнить с машиной Шербиуса, имеющей на статоре явно выраженные полюса, потоки которых сдвинуты по фазе на 120° , и пульсируют по величине. Наличие в цепи двигателя переключений говорит о том, что мощность системы, даже и в случае применения искрогасительных конденсаторов на ключе, не может быть значительной, т. е. достаточной для привода непосредственно деталей рабочего механизма. Как видно из рис. 122, одни концы всех трех обмоток трех пар полюсов соединены в одну точку, приключенную непосредственно к одному из зажимов источника постоянного тока, тогда как другие концы этих трех обмоток присоединены к соответствующим коллекторным пластинам ключа K . Второй полюс источника тока присоединен к кольцу, электрически связанному с катящимися по пластинам роликом P . Число пластин коллектора таково (12 пластин), что одному обороту ключа соответствуют два оборота ротора (каждой обмотке принадлежат на коллекторе четыре пластины).

Предельная скорость ключа 300 оборотов в минуту, что соответствует шестистам оборотам двигателя. Фирма выпускает два типа двигателей: малый тип с вращающим моментом около 3 *гдм* и большой тип с моментом около 15—25 *гдм*. Статический момент составляет в последнем случае 50—60 *гдм*. Статор и ротор двигателя выполняются из листового железа. Следует отметить, что при неподвижном ролике и включенной в сеть системе двигатель работает при $I = \text{const}$. Наоборот, при вращении ротора он переходит в режим работы при $U = \text{const}$. Иногда подобный реактивный двигатель называют полимагнитным двигателем, благодаря большему числу полюсов на статоре по сравнению с ротором.

Применяется система Сперри довольно часто.

116. Реактивный двигатель с крестообразным ротором. Большой точностью передачи обладает реактивный двигатель с крестообразным ротором, применяемый для управления орудиями, минными аппаратами и прожекторами на военных судах ¹ и имеющий фиксированные положения через 15° , т. е. 24 фиксированных положения за один оборот.

Статор двигателя (рис. 123, а) подобен статору двигателя Сперри, т. е. имеет три пары явновыраженных полюсов 1—1; 2—2; 3—3, причем обмотки полюсов каждой пары между собой соединены последовательно. Все обмотки статора одними концами присоединены к одному полюсу 4 постоянного тока, тогда как другие их концы соединены со щетками 1; 2; 3, установленными на ключе, выполненном в виде контроллера с фигурной контактной поверхностью 6. Второй полюс источника постоянного тока подведен к находящейся на поверхности 6 щетке 5. На рис. 123, d представлена развертка контактного барабана ключа, причем пунктирными линиями обозначены различные характерные положения щеток на барабане.

¹Mc. Clelland, The Application of Electricity in Warships, I.E.E. 1927, Vol. 65, pp. 829—781.

Так, положение ротора на рис. 123, с соответствует положению 1,2—V щеток на барабане. В этом случае возбужденными оказываются только обмотки 3—3, так как на контактной поверхности из трех щеток 1; 2; 3 находится только одна 3. Если ключ вращается против направления часовой стрелки (т. е. по стрелке, показанной на рис. 123, d), то обмотки возбуждаются в такой последовательности: 3; 3 и 1; 1 и 2; 2 и т. д. (также против часовой стрелки). Движение же ротора будет происходить скачками через 15° по часовой стрелке. На отдельных рис. 123, а, б, с показаны различные положения ротора при соответственных включениях обмоток. Так, при повороте барабана ключа по стрелке (рис. 123, с) щетки займут положение I—IV, благодаря чему щетки 1; 3 окажутся на контактной поверхности и включают обмотки 1 и 3 статора (на рис. 123, б и с изображены лишь находящиеся под возбуждением обмотки). Положение ротора

по рис. 123, с соответствует положению III—VI щеток на барабане (щетки 1 и 3 в положении III, а щетки 5 и 2 — в положении VI). Величина статического момента двигателя составляет 70—80 гдм, вращающий

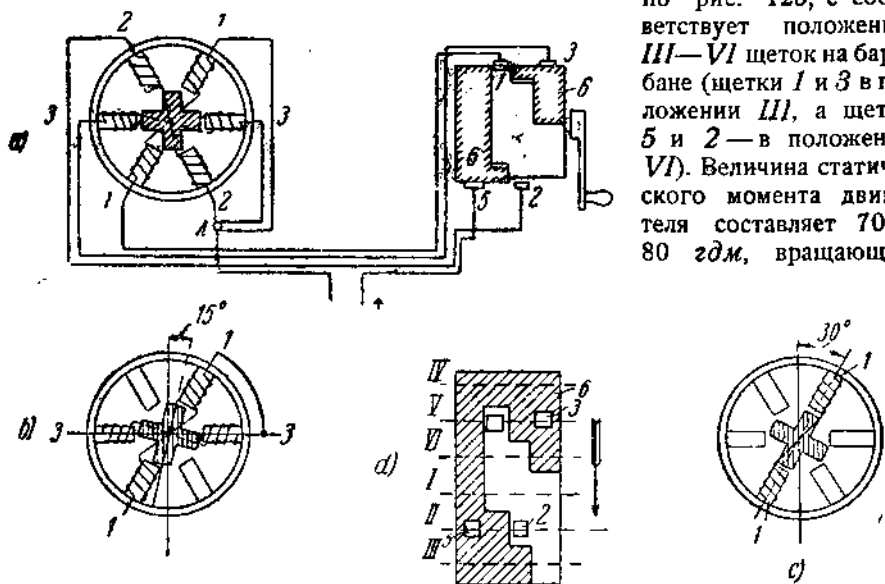


Рис. 123.

же момент равен 12—13 гдм. Так как точность передачи должна быть значительно выше 15° (в особенности в военных установках), то ось двигателя необходимо связывать с рабочей осью через зубчатую передачу, уменьшающую скорость рабочей оси, но повышающую точность ее установки. В случае управления прожекторами и орудиями требуется очень большая степень точности, выражающаяся в малых долях градуса, иначе погрешности указаний будут чрезмерно велики. Так, при ошибке на 1° в случае расстояния до наблюдаемого объекта в 10 000 м будет иметь место смещение относительно цели в наводке орудия или прожектора примерно на 175 м.

Недостатком подобной системы, как и всех систем с синхронными двигателями, является смещение ротора на угол θ от оси потока статора в зависимости от тормозящего момента на валу. Для определенного значения момента можно было бы учесть это смещение. Однако

в процессе работы этот момент, благодаря изменению трения, температуры и т. п., не остается постоянным, что и вносит в работу системы неточности.

Большая скорость передачи в рассматриваемой системе влечет за собой уменьшение вращающего момента и увеличение инерции вращающихся частей, которая может вызвать при быстрых остановках проскакивание ротора и, следовательно, утерю синхронности работы системы. Эти же обстоятельства требуют плавного трогания с места и постепенного нарастания частоты (передача боится „рывков“).

Для питания разобранный выше системы обычно применяется низкое напряжение в 20÷25 В, что при малом сопротивлении линии может дать большие колебания падения напряжения, отзывающиеся на вращающем моменте, который пропорционален квадрату приложенного напряжения. Увеличение сопротивления линии влечет уменьшение статического момента. Однако увеличение сопротивления в некоторой степени оказывается благоприятным для улучшения постоянной времени цепи двигателя, что несколько способствует поддержанию величины вращающего момента при больших скоростях (об этом подробнее см. далее).

117. Реактивный двигатель с цилиндрическим ротором. За последние годы получил распространение реактивный двигатель с трехфазным статором нормальной машины переменного тока и цилиндрическим ротором, выполненным частично из магнитного материала, а частично из немагнитного,¹ что равносильно ротору с выступающими полюсами. Обычно две или четыре полосы из мягкого железа (прямые или изогнутые по дуге) заделывают в цилиндрический алюминиевый ротор так, что получаются два или четыре полюсных выступа. Подобное выполнение позволяет точнее выбалансировать ротор, увеличив равномерность хода, и уменьшить потери на его вращение.

118. Двигатель системы Викакса. Для повышения вращающего момента приходится прибегать к синхронным двигателям с возбуждением постоянным током магнитной системы. Двигатель системы Викакс принадлежит к обращенным синхронным двигателям с возбуждением (рис. 124). Двухполюсный статор двигателя возбуждается постоянным током. Ротор имеет четыре полюса с двумя обмотками (каждая из обмоток наложена на два диаметрально расположенных полюса).

Коллектор-ключ K производит поочередное включение постоянного тока в обмотки 1 и 2, причем направление тока при двух соседних включениях каждой обмотки устанавливается различным.

Коммутация в двигателе осуществляется следующим порядком:

$\overrightarrow{1-1}; \overrightarrow{2-2}; \overleftarrow{1-1}; \overleftarrow{2-2}; \overrightarrow{1-1}$ (стрелки показывают направление тока в обмотках).

Таким образом на роторе получается подобие двухфазной системы переменного тока со сдвигом тока в одной фазе относительно другой на 90° .

Двигатель имеет 4 устойчивых положения на один оборот, т. е. работает не плавно, а толчками, с угловым импульсом в 90° .

С целью облегчения ключа, конструкция которого весьма проста, и уменьшения на нем искрения между двигателем и ключом применены че-

¹ См., например, Е. J. April 1933 р. 176, и герм. пат. № 440758 по кл. 21с, 46 фирмы Викакс.

тыре реле R_1, R_2, R_3, R_4 , служащие для замыкания цепи обмоток 1 и 2 и управляемые от ключа K . При нахождении щетки ключа на какую-либо из четырех его пластин неподвижного коллектора замыкается цепь соответствующего реле, которое, срабатывая, замыкает цепь одной из обмоток. Следующее реле при продвижении щетки замыкает цепь второй обмотки. Третье реле замыкает опять цепь первой обмотки, но с обратным направлением тока. Схема соединений понятна из чертежа. На схеме для простоты проводники показаны подведенными к обмоткам ротора непосредственно, а не через кольца, что имеет место в действительности.

Интересно отметить, что при переключениях обмоток и, следовательно, разрывании их цепей ротор удерживается в неизменном положении за счет реактивного действия магнитного потока статора.

Вращающий момент двигателя Викакса значительно больше, чем момент в двигателе Сперри.

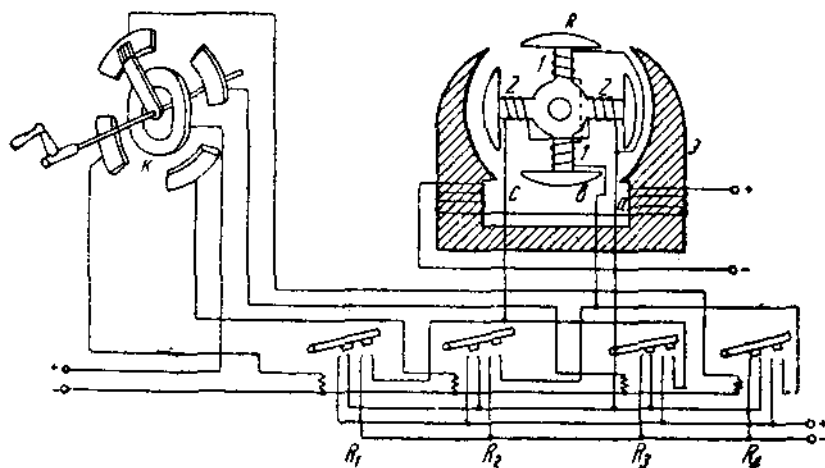


Рис. 124.

Недостатком обеих систем является скачкообразность движения ротора, требующая для повышения точности работы наличия промежуточной передачи между валом ротора и ведомым валом, что уменьшает скорость движения последнего. Кроме того, наличие искрящего коллектора не позволяет далеко идти в отношении мощности синхронных двигателей, увеличение же мощности их за счет введения промежуточных реле усложняет схему.

119. Синхронный двигатель в японской системе синхронной связи. Указанный выше недостаток двигателя Викакса (скачкообразность движения ротора) в значительной степени смягчен в двигателе японской системы, по принципу своего действия аналогичной системе Викакса, а по конструкции напоминающей систему Сперри.

Двигатель (рис. 125) имеет ротор с двумя полюсами, снабженными обмоткой, питаемой постоянным током. Статор выполнен с пятью явно выраженными полюсами 1; 2; 3; 4; 5, снабженными обмотками, одни концы которых соединены в общую точку, а другие приключены к коллекторным пластинкам ключа. Статор двигателя питается от сети постоянного тока через коллектор-переключатель, создающий в двигателе вращающее магнит-

ное поле. Одновременно при любом положении ключа возбужденными на статоре оказываются три полюса, например полюс *I* и противолежащие ему полюса *4*; *3*.

Порядок коммутации, создающей в двигателе вращающее поле (второе условие работы двигателя), осуществляется в такой последовательности:

1	1-2	2	2-3	3	3-4	4	4-5	5	5-1	1
3-4	4	4-5	5	5-1	1	1-2	2	2-3	3	3-4

Таким образом ротор передвигается также скачками, как и в предыдущих системах, но не на 60 или 90°, а всего на 36°, так как имеет десять устойчивых положений за оборот.

Синхронные двигатели приключаются к ключу не через реле, как это имело место в системе Викарса, а непосредственно. Ключ *K* выполнен в виде неподвижного коллектора с вращающимися щетками, ток к которым подводится при помощи неподвижных колец *a*, *b* и скользящих по ним вспомогательных щеток *e*, *f*.

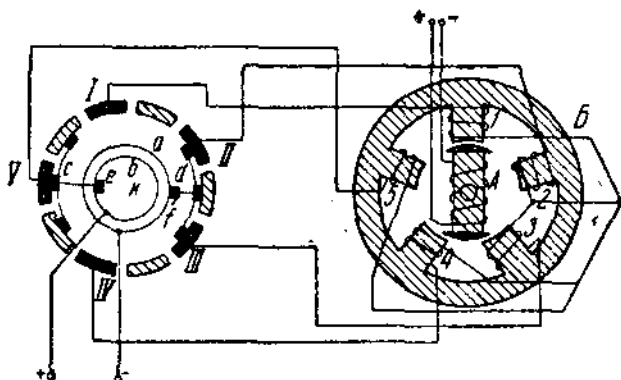


Рис. 125.

Коллектор состоит из десяти пластин, из которых пять холостых. Последние расположены в порядке чередования с пятью пластинами, соединенными с концами обмоток полюсов статора двигателя. Вращающиеся по коллектору щетки выполнены в виде двух диаметрально расположенных комплектов *c* и *d*. Каждый комплект состоит из трех щеток, электрически между собой соединенных и находящихся друг от друга на расстоянии ширины коллекторной пластины. Благодаря такому расположению, если средняя щетка комплекта *c* находится на рабочей пластине, тогда крайние лежат на холостых, в то время как в комплекте *d*, наоборот, средняя лежит на холостой пластине, а крайние — на двух соседних рабочих. В соответствии с этим оказываются включенными три обмотки трех полюсов, причем обмотка одного полюса последовательно соединена с параллельно включенными между собой обмотками двух противолежащих полюсов.

Положение ротора при покое системы, включенной в сеть, является весьма устойчивым, так как поток, проходящий через ротор, распределяясь на два полюса статора, создает благодаря своему искажению два уравновешивающих друг друга статических момента.

Рабочий вращающий момент подобного двигателя обычно составляет около 0,07 кг см.

Недостатком системы является сравнительная сложность ключа и большое количество соединительных проводов между ключом и управляемым двигателем.

Работает последний в принципе как обычный синхронный двигатель с вращающимся полем и возбуждением на роторе. Практически примитивная коммутация, выражающаяся в переключении постоянного тока в полюсах в этом двигателе, так же, как и в рассмотренных выше, вызывает, кроме потерь на искрение в ключе, добавочные потери на высшие гармонические, имеющие место благодаря ступенеобразному изменению тока в обмотках полюсов.

120. Двигатель с гистерезисным моментом. Как известно, при помещении во вращающееся магнитное поле железного диска или цилиндра, выполненного так, что он имеет по всей своей окружности одинаковую магнитную проводимость, указанный диск может притти во вращение в сторону вращения магнитного поля. Это вращение будет осуществляться в общем случае при скорости диска, меньшей скорости поля, за счет токов Фуко и гистерезисного момента. Момент от токов Фуко может быть сведен к нулю путем применения расслоенного ротора, и тогда остается лишь гистерезисный момент. Двигатель, в котором вращение ротора происходит благодаря действию гистерезисного момента, можно назвать двигателем с гистерезисным моментом или гистерезисным двигателем.

Подобный двигатель может быть применен и применяется для вращения маломощных устройств (стрелок и т. п.). Он представляет собой двигатель, близкий по принципу своего действия реактивному двигателю, и в большинстве случаев по конструкции имеет в себе элементы обычного реактивного двигателя, что делается с целью получения большего вращающего момента (двигатель для электрических синхронных часов).

Возможность действия гистерезисного двигателя вытекает из рассмотрения общих условий работы электрического двигателя вообще: наличие сдвига между полем и м. д. с. двигателя и коммутация. Последняя осуществляется вращающимся полем. В случае наличия гистерезиса, как известно, намагничивающий ток сдвигается по фазе относительно потока на так называемый угол магнитного запаздывания. Поэтому поток, проходящий через ротор, и м. д. с. в междужелезном пространстве оказываются сдвинутыми на некоторый угол. (Если бы явление гистерезиса имело место лишь в статоре, то сдвига в воздушном зазоре между Φ и AW не было бы; этот сдвиг определяется гистерезисом в теле ротора.)

На основании указанного выше можно отметить, что между Φ и AW возникнет момент, равный

$$M_z = c AW \Phi \sin \alpha, \quad (129)$$

где c — некоторый постоянный коэффициент.

По современной теории ферромагнетизма предполагается, что всякое ферромагнитное вещество состоит из множества элементарных магнитов молекулярных размеров. Если какой-либо цилиндр из магнитного материала (ротор) поместить в постоянное магнитное поле, то все указанные элементарные магниты повернутся, ориентируясь в определенную сторону, в зависимости от направления поля, в которое внесен цилиндр. Теперь, если начать вращать указанное поле, то при неподвижном роторе магниты

будут поворачиваться за полем. Так как вращение магнитов происходит как бы с некоторым трением (молекулярное трение), то магниты будут отставать на некоторый угол от поля, что вызывает между полем и ротором силу тяжения, которая имеет касательную составляющую (рис. 126), создающую на валу момент M_2 (гистерезисный момент).

Как известно, наличие гистерезисного момента имеет место и в обычном асинхронном двигателе, причем при скорости ротора ниже синхронной указанный момент действует в сторону вращения ротора (режим двигателя), а при скорости выше синхронной момент меняет свой знак, т. е. действует тормозящим образом (генераторный режим).

Мощность, передаваемая со статора на ротор благодаря гистерезису, равна:

$$P_0 = \eta B^{1,6 \div 2} f V, \quad (130)$$

где η — постоянная гистерезиса, B — индукция, f — частота питающего тока и V — объем железа ротора.

Если последний вращается с угловой скоростью ω_2 , то в механическую энергию преобразуется часть энергии P_0 , равная $P = M\omega_2$. Остальная часть ее тратится на потери в железе на гистерезис, т. е. на вращение элементарных магнитов. Действительно, если ротор стоит, то перемагничивание железа ротора, т. е. вращение элементарных магнитов, происходит пропорционально частоте f (вся мощность тратится на потери). При вращении же ротора скорость вращения магнитов уменьшается до величины, соответствующей частоте скольжения $f s$. Благодаря этому на потери в роторе будет идти мощность $P_2 = s f \eta B^{1,6 \div 2} V$. Остальная часть мощности P_0 , благодаря наличию момента M_2 , поступает на вал ротора в качестве механической мощности:

$$P = M_2 \omega_2 = P_0 - P_2 = (1 - s) f \eta B^{1,6 \div 2} V.$$

Принимая во внимание, что $\omega_2 = (1 - s) \omega$, для момента M_2 получим выражение:

$$M_2 = \frac{P}{\omega_2} = \frac{(1 - s) f \eta B^{1,6 \div 2}}{(1 - s) \omega} \cdot V = \frac{f \eta B^{1,6 \div 2}}{\omega} \cdot V = \frac{p}{2\pi} \eta B^{1,6 \div 2} V, \quad (131)$$

т. е. величина момента M_2 не зависит от скорости ротора и поля, чего и следовало ожидать, так как момент определяется тяжением магнитных линий, зависящих от гистерезисных свойств железа и величины индукции.

Таким образом вращающееся поле, имея движение относительно ротора, грубо говоря, вращает элементарные магниты и тем самым сообщает ротору вращающий момент, так как указанные магниты имеют некоторый тормозящий момент.

При скорости ротора, большей скорости поля, элементарные магниты будут принуждены поворачиваться в сторону, противоположную вращению

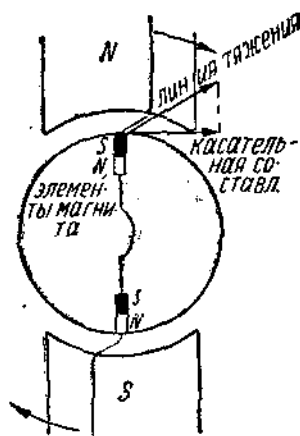


Рис. 126.

ротора, так как поле в этом случае отстаёт от ротора, т. е. движется относительно него в обратную сторону (генераторный режим).

На рис. 127 изображена диаграмма мощности, обусловленной гистерезисом, в зависимости от скольжения.

Передаваемая со статора на ротор гистерезисная мощность P_0 и гистерезисный момент M_2 не зависят от скольжения и следовательно могут быть изображены прямой BC , параллельной оси абсцисс. При переходе через синхронизм момент M_2 меняет свой знак, т. е. имеет место так называемый гистерезисный скачок (скачок гистерезисной мощности, равный $2M_2\omega$). Уже отмечалось, что на покрытие потерь на гистерезис будет расходоваться мощность, равная $P_2 = P_0 s$. Поэтому на диаграмме она изображается наклонной прямой BD , проходящей через нуль при $s = 0$. Ординаты между прямыми BC и BD будут представлять собой часть мощности P_0 , преобразуемую в механическую энергию на валу: $P = P_0 (1 - s)$.

В случае $s = 0$ будем иметь синхронный режим двигателя с гистерезисным моментом. При рассмотрении работы асинхронного двигателя изменение мощности при $s = 0$ учитывалось как переходный режим при пере-

воде двигателя в режим генератора от первичного двигателя. Этот переходный режим, равно как и гистерезисный момент при работе асинхронной машины двигателем, практически можно было не принимать во внимание благодаря тому, что гистерезисная мощность в нормальной машине составляет ничтожную часть от общей мощности.

В двигателе же предельно малой мощности момент, развиваемый двигателем за счет гистерезиса, уже сравним с моментом

для этого двигателя, работающего в качестве асинхронного, так как первый момент с уменьшением размеров двигателя уменьшается в меньшей степени, чем второй.

Если момент торможения меньше, чем гистерезисный момент двигателя, то можно говорить о синхронном его режиме. В этом случае он превращается в синхронный двигатель с множеством элементарных, как бы эластично закрепленных полюсных систем на роторе. Тормозящий момент двигателя сдвигает их оси в сторону отставания от оси м. д. с. и благодаря тяжению магнитных линий двигатель развивает момент, уравновешивающий тормозящий момент, пропорциональный например $C'D$ на рис. 127. Если уменьшать тормозящий момент, то величина гистерезисного момента начинает также уменьшаться, так как уменьшается угол поворота осей элементарных магнитов относительно м. д. с. статора.

Далее, если к валу машины приложен некоторый вращающий момент, то гистерезисная мощность переходит через нуль (идеальный холостой ход, как это имело место и в нормальном синхронном двигателе), затем меняет свой знак, т. е. теперь она передается с вала первичного двигателя при посредстве электромагнитного поля на статор (генераторный режим).

При увеличении момента на валу выше значения, пропорционального DE , двигатель переходит в асинхронный режим, причем далее значение момента M_2 остается неизменным (элементарные полюсные системы начинают проворачиваться). Таким образом за пределами синхронизма (в обе стороны) двигатель

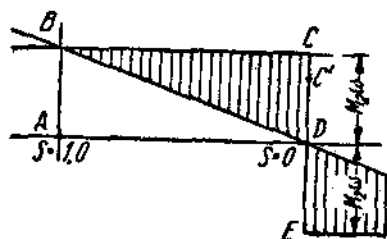


Рис. 127.

может развивать вращающий момент, неизменный по величине, который для синхронного режима является максимальным (опрокидывающим) моментом. Поэтому гистерезисный двигатель в чистом виде в асинхронном режиме устойчиво работать не может. Если двигатель выполнен с ротором, имеющим неодинаковую магнитную проводимость по своей окружности, то на эффект гистерезисного двигателя накладывается еще эффект реактивного двигателя, что обеспечивает надежную работу в синхронном режиме.

Указанные обстоятельства и надлежит учитывать при расчете реактивного двигателя.

Гистерезисный двигатель, принадлежа как имеющий синхронный режим к синхронным двигателям, имеет определенный пусковой момент, действующий в асинхронном (не установившемся) режиме. Подобный двигатель поэтому применяется в мало-мощных установках, где нужно автоматическое впадение в синхронизм при наличии пускового момента (электрические синхронные часы).

По своей природе гистерезисный двигатель занимает промежуточное положение между обычным синхронным двигателем с возбуждением постоянным током и реактивным двигателем с неодинаковой магнитной проводимостью ротора по его окружности.

Для схем синхронной связи применяется комбинированная конструкция гистерезисного и реактивного двигателя. Следует отметить, что в обычной асинхронной машине всегда как бы встроен синхронный гистерезисный двигатель, работающий в асинхронном режиме.

На рис. 128 изображен однофазный синхронный двигатель гистерезисного типа, предложенный фирмой Warren Clock Company (Америка) для привода часовых механизмов.

Для получения вращающегося поля при пуске двигатель имеет расщепленные полюса 1; 2 на статоре с короткозамкнутыми обмотками 3; 4. Ротор без обмотки выполнен в виде тонкого гладкого диска 5 из закаленной стали без каких-либо прорезов или выступов. Как известно, такая сталь обладает большим гистерезисом, который и обуславливает вращающий момент двигателя, имеющий место не только при синхронном вращении, но и при пуске. Так как ротор его очень мал и легок, то инерция его весьма невелика, благодаря чему он чрезвычайно быстро раскручивается при включении и впадает в синхронизм, равно как и останавливается при выключении.

Ротор имеет вертикальный приводной вал 6 и расположен ниже середины полюсных поверхностей, чтобы уменьшить трение в опорах (имеется один подшипник). Для дальнейшего уменьшения трения и устранения внешних влияний ротор и привод заключены в кожух, наполненный смазочным маслом.

Общий вид гистерезисного двигателя типа „Telechron“ показан на рис. 129, на котором виден стеклянный кожух с помещенным внутри него ротором и передачей.

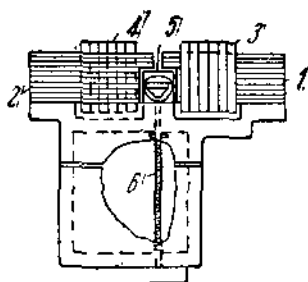
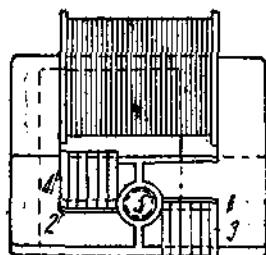


Рис. 128.

Мощность, подводимая к таким двигателям, обычно составляет около 2 W при 3—6 VA благодаря низкому коэффициенту мощности.

Коэффициент полезного действия весьма низок (менее 1%), что при малой мощности не играет существенной роли.

121. Синхронный двигатель с возбуждением от сети переменного тока через выпрямитель. Для установок средней и большой мощности реактивный двигатель оказывается мало пригодным (низкий коэффициент мощности и большие габариты), несмотря на свою весьма заманчивую простоту и отсутствие специального источника тока для возбуждения.

Вместе с тем в этих установках не могут быть применяемы наиболее простые источники переменной частоты — коллекторы-переключатели. Они заменяются коллекторными генераторами или преобразователями. В качестве

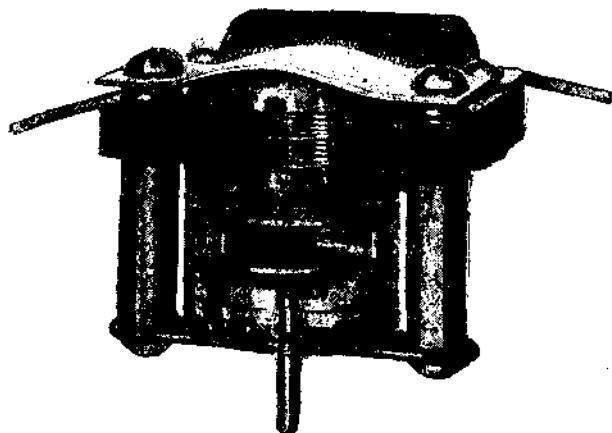


Рис. 129.

приемников служат нормальные синхронные двигатели с возбуждением постоянным током (с вращающимися или неподвижными индукторами). Неудобство применения второго источника тока для возбуждения двигателей заставляет искать разрешения проблемы возбуждения в плоскости использования питающей якорь двигателя сети переменного тока.

Одним из таких решений является возбуждение индукторов двигателя от сети переменного тока через выпрямители.

Схема подобного двигателя представлена на рис. 130. Обмотка возбуждения R двигателя приключена одним своим концом (на схеме не изображены кольца на валу двигателя) к нулевой точке трехфазной обмотки статора, а другим — к средней точке выходных концов вентилях N , входные концы которых присоединены к соответствующим фазам управляющей двигателем сети. Применение трех вентилях обеспечивает постоянный ток в обмотке возбуждения без больших пульсаций. Вообще же мог быть включен и один выпрямитель в одну из фаз. В качестве вентилях могут быть применены самые различные типы выпрямителей, в частности получающие большое распространение меднозакисные выпрямители. Возможно также в случае средних или малых мощностей применение механических коллекторных выпрямителей, насаживаемых непосредственно на вал синхронного двигателя.

Следует отметить, что при использовании нулевой точки статора по его обмотке будет проходить выпрямленный постоянный ток, повышающий потери двигателя. Для устранения этого обычно для двигателей, работающих от сети с неизменной частотой, присоединяют выпрямители к сети переменного тока через трансформатор. Однако этот способ в данном

Случае непригоден, так как при нулевой частоте ротор окажется лишенным возбуждения (между обмоткой возбуждения и сетью нет электрической связи).

Вследствие наличия пульсаций постоянного тока в роторе в фазах статора индуцируется ряд гармоник, которые несколько искажают форму тока статора, увеличивая потери в двигателе. Для уменьшения пульсаций обмотка возбуждения может быть выполнена с большим индуктивным сопротивлением или же должны быть включены в цепь ротора реактивные катушки.

Подобный двигатель, сохраняя все достоинства синхронного двигателя с возбуждением, соединен с управляющим постом тремя проводами. Недостатком такого двигателя является несколько низкий коэффициент полезного действия благодаря выпрямителю и увеличению габаритов установки. Предлагались также к применению однофазные двигатели типа колеса Лакура с возбуждением от сети переменного тока через выпрямитель, состоящий из двух полуколес. Наличие возбуждения ощутительно повышает вращающий момент подобного двигателя. Еще одним примером синхронного двигателя с возбуждением от сети переменного тока через выпрямитель может служить получающий за последнее время распространение вентильный двигатель, управляемый при помощи сеток и также возбуждаемый постоянным током от сети переменного тока через выпрямитель.

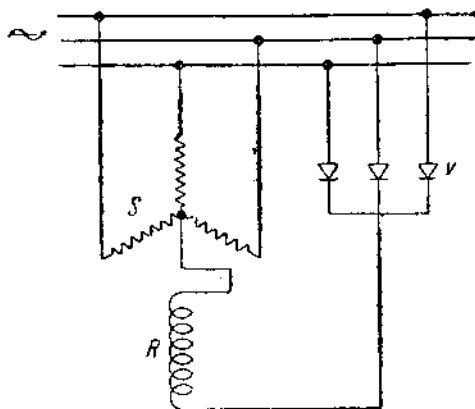


Рис. 130.

122. Двигатель двойного питания в синхронном режиме. Можно освободиться от выпрямителей в цепи возбуждения при питании ее от сети переменного тока, если применить трехфазный индукционный двигатель двойного питания, работающий в синхронном режиме. Как известно, индукционный бесколлекторный двигатель может иметь синхронный режим, если в сеть переменного тока включить обе его обмотки (статора и ротора). При вращении полей последних в разные стороны, что достигается соответственным подбором порядка следования фаз, двигатель будет работать с двойным синхронным числом оборотов, вращаясь в сторону вращения поля статора. Очевидно, что для приключения его к сети с нормальной частотой двигатель нужно развернуть до двойного синхронного числа оборотов и синхронизировать, как и обычный синхронный двигатель. При работе в схеме синхронной связи подобный двигатель при частоте, равной нулю, будет находиться в устойчивом положении благодаря неподвижным в пространстве полям статора и ротора, а при плавном нарастании частоты придет во вращение с числом оборотов, отвечающим двойной частоте питающей его сети переменного тока.

Подробнее о работе трехфазного индукционного двигателя двойного питания см. далее.

123. Синхронный двигатель — редуктор скорости. В схемах синхронной связи малой мощности применяют, как было указано выше, синхрон-

ные двигатели импульсного типа (Сперри, Эриксона, двигатель японской системы передачи), которые имеют скачкообразное движение ротора, причем такой скачок составляет $45-30-10^\circ$. Очевидно, что непосредственное соединение вала двигателя с валом исполнительного механизма не представляется возможным. Поэтому между указанными валами приходится обычно применять зубчатую передачу, увеличивающую точность работы и одновременно снижающую скорость вращения вала исполнительного механизма.

Вопрос снижения скорости, необходимый иногда по ряду причин, может быть разрешен и чисто электромагнитным путем применением синхронного двигателя специальной конструкции, предложенной Чэббом (L. W. Chubb; Westinghouse El. Co). В этом двигателе, представляющем собой компактную конструкцию, можно получить ряд синхронных скоростей, находящихся в определенном постоянном соотношении со скоростью вращающегося поля, создаваемого переменным током, поступающим от ключа.

Таким образом подобный синхронный двигатель одновременно работает как редуктор скорости, повышая точность передачи и позволяя производить передачу одновременно с различными ступенями цены деления без применения зубчатых передач.

Указанный двигатель может иметь и еще ряд применений, например в счетных и решающих приборах, счетчиках оборотов, электрических часах и т. п.

На рис. 131 схематически изображен двигатель Чэбба применительно к электрическим часам.

На рис. 131 схематически изображен двигатель Чэбба применительно к электрическим часам.

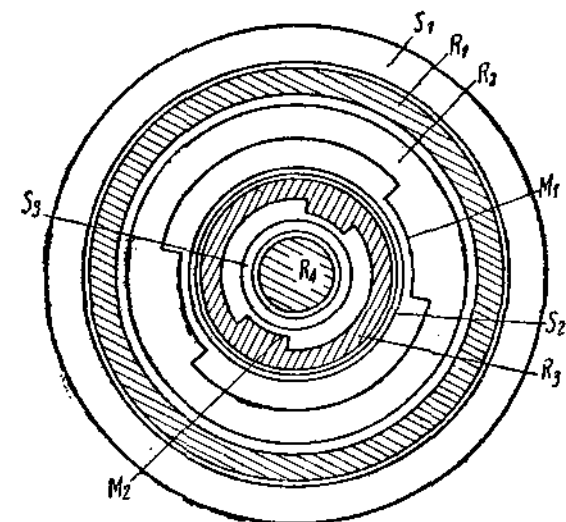


Рис. 131.

Статор S_1 , выполненный в виде кольца из листового железа, имеет на своей внутренней поверхности 118 зубцов и несет двухполюсную трехфазную или однофазную обмотку переменного тока. В случае однофазной обмотки для создания вращающегося поля имеется вспомогательная фаза, включенная через конденсатор.

В частном случае применения подобного двигателя к электрическим часам его обмотка статора питается током 60 Hz, т. е. поле делает в пространстве 60 оборотов в секунду. В расточке статора помещен целый ряд выполненных в виде колец, входящих одно в другое, роторов R_1, R_2, R_3, R_4 . Ротор R_1 , находящийся в непосредственной близости к статору S_1 , изготовлен из массивного железного кольца, которое на внешней поверхности несет 120 зубцов. Благодаря этому, когда на одной стороне зубец статора приходится против зубца ротора, на диаметрально противоположной стороне зубец статора оказывается расположенным также против зубца ротора. В этом случае магнитный поток проходит через ротор в радиальном направлении по пути наименьшего магнитного сопротивления.

При сдвигании вращающегося потока по окружности ротор будет также несколько поворачиваться в положение наибольшей магнитной проводимости (реактивный двигатель с двухполюсным статором и многополюсным ротором наподобие колеса Лакура). Так, если поток повернется на 45° , ротор R_1 окажется повернутым на четверть зубцового деления (шага).

Благодаря этому, одному обороту магнитного поля будет соответствовать поворот ротора на двойное зубцовое деление. Формула для оборотов ротора в этом случае будет иметь вид:

$$n_{R_1} = \frac{z_{R_1} - z_{S_1}}{z_{R_1}} \cdot \frac{f}{p} \cdot 60 \text{ об/мин.}, \quad (132)$$

где z_{R_1} и z_{S_1} — число зубцов ротора и статора. При 60 Hz в данном частном случае будем иметь:

$$n_{R_1} = \frac{120 - 118}{120} \cdot 3600 = 60 \text{ об/мин.}$$

Ротор R_1 , выполненный из сплошного кольца, представляет собой значительное сопротивление вдоль окружности, благодаря чему поток проходит в ротор R_2 из листового железа.

Ротор R_1 имеет 122 зубца по своей внутренней поверхности и служит в качестве первичной части (статора) для второго ротора R_2 , имеющего 120 зубцов.

Скорость вращения ротора R_2 относительно ротора R_1 составляет (таким же образом, как и выше):

$$n_{R_2} = \frac{z_{R_2} - z_{R_1}}{z_{R_2}} \cdot \frac{f}{p} \cdot 60 = \frac{120 - 122}{120} \cdot (3600 - 60) = -59 \text{ об/мин.}$$

Таким образом ротор R_2 делает 59 об/мин относительно ротора R_1 в сторону, обратную вращению последнего.

Следовательно, в пространстве ротор R_2 делает $60 - 59 = 1$ об/мин в сторону вращения ротора R_1 .

С ротором R_2 механически сцеплена секундная стрелка часов.

Очевидно, что в случае других применений подобного двигателя соответствующим подбором соотношений чисел зубцов статора и ротора можно получить любую другую уменьшенную скорость.

Вращающееся магнитное поле, как ранее указывалось (рис. 101), можно получить не только помощью многофазного тока, но также при помощи вращаемых механически постоянных магнитов или электромагнитов. В этом случае роль зубцов статора должны играть специальные железные штифты, укрепленные на кольце из немагнитного материала. Дальнейшие части конструкции рассматриваемого двигателя как раз и выполнены подобным образом.

Ротор R_2 несет на своей внутренней поверхности постоянные магниты M_1 , которые создают новое поле, вращающееся вокруг кольца из изолирующего материала S_2 , в котором укреплено 118 железных штифтов, служащих зубцами вторичного статора. Таким образом последний состоит из двух частей — вращающегося поля M_1 и кольца S_2 — эквивалентных вместе нормальному зубчатому статору с вращающимся полем. Кольцо S_2 окружает ротор R_2 , имеющий на внешней своей поверхности 120 зубцов. Магниты M_1 вращаются со скоростью одного оборота в минуту, что дает

скорость вращения ротора R_3 один оборот в час (расчет скорости производится по той же формуле, что и для ротора R_1). Ротор R_3 , с которым связана минутная стрелка часов, несет вторичные постоянные магниты M_2 , которые вращаются вокруг бронзового кольца S_3 с 22 железными штифтами, служащими зубцами статора, образуемого кольцом S_3 и магнитами M_2 и окружающего ротор R_4 с 24 зубцами, который делает один оборот за двенадцать часов и связан с часовой стрелкой часов. Двигатель, основанный на таком принципе, может найти себе весьма различное применение в установках малой мощности, в которых необходим привод с низкой синхронной скоростью.

Большое преимущество рассматриваемого двигателя заключается в том, что момент за время оборота имеет неизменную величину, причем ротор не обладает ощутимой инерцией.

При работе в качестве синхронного двигателя от сети с постоянной частотой двигатель Чёбба должен иметь пусковое устройство для трогания с места и автоматического впадения в синхронизм. Для этого он может быть снабжен обмоткой по типу беличьей клетки или же можно использовать гистерезисный эффект (гистерезисный момент) и токи Фуко. Какими-либо данными для автоматического пуска должен обладать лишь первый ротор, так как скорость остальных роторов настолько низка, что они непосредственно впадают в синхронизм при трогании с места.

В случае применения подобного двигателя в схемах синхронной связи вопрос пуска и синхронизирования отпадает.

124. Реактивный двигатель по типу индукционных двигателей для работы от сети с неизменной частотой. В целом ряде установок с синхронными двигателями (звуковое кино, телевидение и т. д.) требуется бо́льший момент, чем момент, развиваемый весьма малыми двигателями типа двигателей Сперри, Викаерса, двигателей для часов или типа колеса Лакура. Для этих целей применяются реактивные двигатели, по мощности занимающие промежуточное положение между указанными весьма малыми двигателями и обычными асинхронными двигателями (от 5 kW). Такие реактивные двигатели выполняются в конструктивном отношении по типу индукционных двигателей с некоторыми видоизменениями, обусловленными получением реактивного момента.

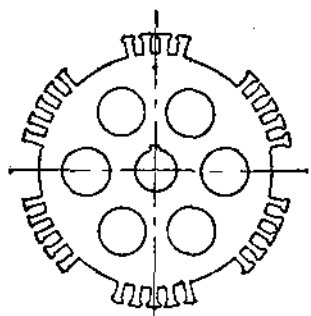


Рис. 132.

Статор рассматриваемых двигателей ничем не отличается от статора индукционных двигателей. Ротор снабжен пусковой короткозамкнутой обмоткой (беличьей клеткой), уложенной в почти обычные пазы ротора индукционного двигателя. Для образования полюсных выступов часть зубцов ротора срезана, как это показано на рис. 132, где представлен лист железа ротора. Близкое сходство с индукционным двигателем в конструктивном отношении позволяет провести сравнение этих двигателей одинаковых габаритов по эксплуатационным свойствам. Типичная кривая моментов двигателя в зависимости от скорости представлена на рис. 133, на которой видно, что опрокидывающий момент индукционного двигателя не отличается сильно от максимального пускового момента. (Следовательно, в роторе имеет место значительное активное сопротивление). Опрокидывающий

момент синхронного режима двигателя составляет примерно треть от опрокидывающего момента асинхронного режима. Следовательно, для малых двигателей можно сказать, что в таком же соотношении находятся моменты нормальной нагрузки для обоих режимов. Это позволяет определять в большинстве случаев мощность реактивных двигателей подобного типа через мощность индукционного двигателя тех же размеров, а именно: первая составляет треть от второй.

Надлежит отметить, что величина пускового момента подобного реактивного двигателя находится в связи с величиной момента впадения в синхронизм. Действительно, если желательно увеличить пусковой момент, нужно увеличить, как известно, сопротивление пусковой обмотки, что повлечет за собой более пологий наклон кривой моментов двигателя при скоростях двигателя, близких к синхронизму. Благодаря этому для данного рабочего момента в двигателе с роторной обмоткой с большим сопротивлением будет иметь место и большее скольжение, впадение же в синхронизм происходит при очень небольшом скольжении. Следовательно, оно в рассматриваемом случае может иметь место лишь при пониженном моменте на валу.

Благодаря незначительной мощности в двигателе следует считать с явлением „прилипания“ при пуске, для устранения которого, как обычно, скашивают пазы, а затем делают неодинаковые полюсные выступы (рис. 132).

В синхронном режиме ток будет больше, а коэффициенты мощности и полезного действия ниже, чем при асинхронном режиме и трети полной нагрузки.

Однако при тех небольших мощностях, на которые строятся реактивные двигатели, это обстоятельство не играет существенной роли, равно как и недостаточное использование активных материалов (треть нагрузки). Все эти недостатки искупаются исключительной простотой, которой обладают подобные реактивные двигатели. У нас в Союзе реактивные двигатели, выполненные по типу индукционных двигателей, начинают распространяться довольно значительно, будучи применяемы для целей звукового кино. Они изготавливаются на ленинградском заводе Союзкино путем переделки (выфрезерования части железа для получения полюсных выступов и закладывания между последними медных полос) асинхронных двигателей, выпускаемых зав. „Электросила“ им. Кирова. Очевидно, что подобный двигатель может найти применение и в некоторых системах синхронной связи.

Применение реактивного двигателя чрезвычайно обширно. Кроме указанных выше областей он служит для привода фонографа и различных самопишущих приборов. В лабораториях и испытательных установках

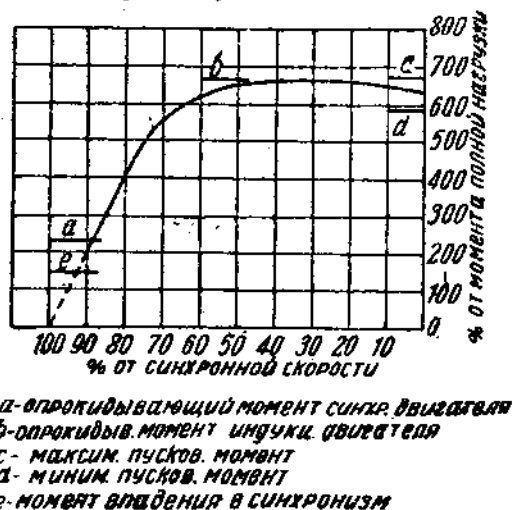


Рис. 133.

двигатель нашел применение для вращения дисков синхроскопов, контактов для определения временных зависимостей и т. п.

Применяемые в различных схемах синхронной связи синхронные двигатели, конечно, не исчерпываются приведенными в настоящей главе различными типами специальных синхронных двигателей. Число конструкций подобных двигателей весьма велико. Они в значительной степени нашли отражение только в патентной литературе, частично же вовсе не описаны благодаря применению этих конструкций в специальных военных установках.

Важно было привести лишь наиболее характерные типы, позволяющие составить ясное представление о современных тенденциях в области построения синхронных двигателей для схем синхронной связи.

ГЛАВА XX.

РАБОТА СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ МЕНЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЕ.

125. Введение. Обычно работа синхронных двигателей рассматривается при неизменных частоте и напряжении питающего тока, так как двигатель подключается к сети центральной станции. Иногда лишь применяется пуск в ход синхронного конденсатора от отдельного генератора путем постепенного увеличения частоты подведенного тока при возбужденных полюсах.¹

В схемах синхронной связи имеет место режим работы, совершенно отличный от указанного, а именно: двигатели работают при переменной частоте и переменном напряжении или же только при изменяющейся частоте.

Такой режим работы существенным образом меняет свойства двигателя и поэтому надлежит установить наивыгоднейшие условия работы синхронных двигателей различных типов при меняющейся частоте.

Прежде всего отметим вообще все характерные черты работы двигателя в схеме синхронной связи.

Основным фактором, определяющим рабочие свойства двигателя, является частота питающего тока, изменяющаяся от нуля до некоторого максимума. Следовательно, двигатель работает при переменном числе оборотов. В зависимости от характера привода рабочий момент двигателя является той или иной функцией изменения числа оборотов.

Наиболее характерными зависимостями между числом оборотов n и моментом нагрузки M_n являются, как уже отмечалось, следующие:

а) момент на валу изменяется обратно пропорционально частоте:

$$M_2 = M_1 \frac{f_1}{f_2};$$

б) момент имеет постоянную величину при всех значениях числа оборотов n , т. е. $M = \text{const}$;

в) момент пропорционален квадрату частоты:

$$M_2 = M_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2.$$

¹ R. Bröderlin, ETZ 1924., № 46, стр. 1239—1240.

Обычно, чаще всего в схеме синхронной связи, имеет место работа двигателя при постоянном моменте M , так как вращаемая двигателем деталь представляет неизменный момент торможения. Первый случай характерен для условий тяги. Третья зависимость момента от числа оборотов, т. е. от частоты, имеет место, например, при приводе гребных винтов.

При $M_2 = M_1 \frac{f_1}{f_2}$ величина отдаваемой двигателем мощности остается неизменной, так как уменьшение числа оборотов покрывается увеличением тормозящего момента и наоборот.

Характер изменения тока, потока и $\cos \varphi$ при этом зависит от того, как меняется питающее двигатель напряжение в функции от частоты f . В случае $M = \text{const}$ мощность пропорциональна числу оборотов. При $M_2 = M_1 \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2$ мощность, развиваемая двигателем, оказывается пропорциональной кубу числа оборотов.

Исследование работы синхронных и асинхронных двигателей при меняющейся частоте показывает, что для получения нормальной работы, т. е. нормальных значений коэффициента мощности, коэффициента устойчивости, силы тока и к. п. д., необходимо производить соответственно с изменением частоты регулирование напряжения, причем характер этого регулирования зависит от вида функции

$$M = f(n).$$

В общем случае для нормальной работы должно иметь место следующее соотношение: ¹

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}.$$

Подставляя в это выражение частные значения $\frac{M_2}{M_1}$ для приведенных выше различных случаев работы двигателя, будем иметь:

В случае а) для нормальной работы должно быть соблюдено соотношение:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{f_1}{f_2}} = \sqrt{\frac{f_2}{f_1}}.$$

Случай б) требует регулирования напряжения в такой зависимости:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \frac{f_2}{f_1}.$$

Следовательно, в наиболее важном случае работы синхронного двигателя в схеме синхронной связи ($M = \text{const}$) необходимо, чтобы напряжение изменялось пропорционально частоте. Подобная зависимость, как уже отмечалось, может быть легко получена в системах с коллекторными генераторами переменной частоты, которые поэтому и обуславливают наиболее удачную эксплуатацию синхронных двигателей.

Большинство же источников переменной частоты дают постоянное напряжение переменной частоты, что понижает эффективность работы двигателей (подробнее об этом см. далее).

¹ М. П. Костенко, Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов. Журн. "Электричество", 1925 г., № 2, стр. 87—95.

т. е. возбуждение остается неизменным, а с изменением частоты пропорционально ей регулируется подводимое напряжение, что обеспечит нормальные условия работы двигателя, в частности недопущение снижения при возрастании частоты коэффициента устойчивости, представляющего собой отношение максимального момента $M_{\max}$ при данной скорости к нормальному моменту на валу двигателя.

Очевидно, что наилучшие условия работы будут иметь место именно при постоянстве указанного коэффициента, в частности, когда $M_n = \text{const}$ при постоянстве $M_{\max}$, так как в этом случае двигатель не боится внезапных перегрузок, не нарушающих синхронность работы системы.

На основании приведенных выше соотношений для получения нормальной работы двигателя может быть составлена таблица (VIII) зависимости моментов, мощностей, напряжений, потоков и активных токов от частоты в указанных трех случаях.

ТАБЛИЦА VIII.

	$\frac{M_2}{M_1}$	$\frac{P_2}{P_1} \approx$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{\Phi_2}{\Phi_1}$	$\frac{I_{a2}}{I_{a1}}$
a	$\frac{f_1}{f_2}$	const	$\sqrt{\frac{f_2}{f_1}}$	$\sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$	$\sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$
b	const	$\frac{f_2}{f_1}$	$\frac{f_2}{f_1}$	const	const
c	$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2$	$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^3$	$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2$	$\frac{f_2}{f_1}$	$\frac{f_2}{f_1}$

Таким образом при основном режиме работы двигателя в схемах синхронной связи (случай b) поток и активный ток сохраняют неизменную величину при всех значениях частоты, что следует и из общего выражения для момента $M = k\Phi I_a$.

В случае a активный ток должен расти с уменьшением числа оборотов (условия тяги) так, чтобы мощность на валу оставалась неизменной. В случае же c, наоборот, ток I_a растет с увеличением частоты сети.

Рассмотрим упрощенную диаграмму напряжений синхронного двигателя при меняющейся частоте и постоянном нагрузочном моменте на его валу.

Пренебрежем активным падением напряжения в двигателе (при малых частотах допущения $r = \Omega$ без внесения существенной погрешности сделать нельзя) и повернем диаграмму так, чтобы вектор напряжения на зажимах двигателя совпал с осью абсцисс. Тогда будем иметь диаграмму, представленную на рис. 134. Здесь $U_c = Of$ — напряжение сети; $E = Oq$ — э. д. с. от потока возбуждения; $I_x = aq$ — реактивное падение напряжения в двигателе (с учетом реакции якоря); $U_{ds} = Oa$ — равнодействующая э. д. с. на зажимах двигателя, т. е. E и I_x , уравнивающая напряжение сети.

Диаграмма представлена для частного случая, при $\cos \varphi = 1$.

Желательно так регулировать напряжение U_c , чтобы получить допустимый коэффициент устойчивости; $\cos \varphi = \text{const}$, $I_a = \text{const}$ и наилучший к. п. д.

Как известно, при постоянных значениях напряжения U_c и полного синхронного сопротивления x мощность двигателя пропорциональна перпендикуляру, опущенному из конца вектора E на вектор $U_{\partial a}$ или его продолжение (в данном частном случае мощность пропорциональна отрезку aq).

$$aq = Ix \cos \varphi, P = UI \cos \varphi = \frac{U}{r} \cdot aq \quad (136)$$

$$P = \frac{E}{x} U \sin \theta.$$

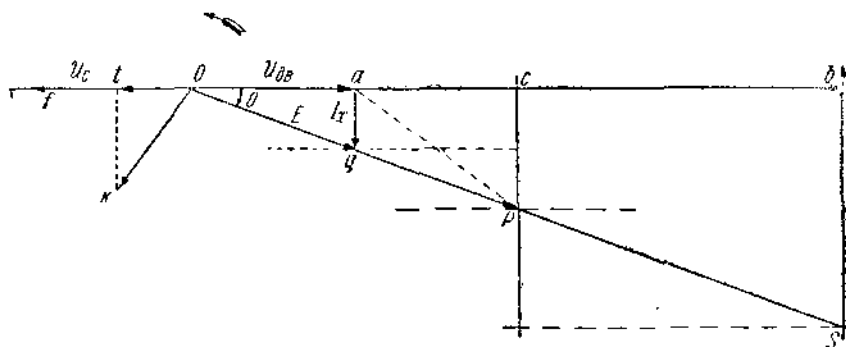


Рис. 134.

Реактивное сопротивление двигателя благодаря удвоенной частоте возрастет также вдвое. Следует заметить, что такое увеличение будет иметь место как для реактивного сопротивления X_s от потоков рассеяния, так и для реактивного сопротивления X_a , соответствующего реакции якоря. В последнем случае можно говорить, что поток реакции якоря индуцирует э. д. с. E_a , величина которой пропорциональна частоте.

Можно рассматривать также, что ампервитки реакции якоря, размагничивая основной поток, уменьшают действительную обратную э. д. с. двигателя, индуктирующуюся в обмотке статора, на величину, пропорциональную частоте питающего тока. С

Обращаясь к выражению (136) для P , отметим, что величина $\frac{U_c}{\epsilon}$

останется неизменной и при новом значении частоты и напряжения U_c , а возрастает вдвое перпендикуляр aq и станет равным отрезку cp .

Из выражения (136) для P видим, что $\sin \theta = \text{const}$, т. е. при увеличившейся вдвое мощности, благодаря одновременному увеличению U_c и E при $\Phi = \text{const}$ угол θ остался неизменным, а новый треугольник напряжений — подобным первоначальному (в данном частном случае остался прямоугольным).

Таким образом коэффициент мощности и ток двигателя остались неизменными. Последнее следует из того, что

$$I = \frac{Ix}{x} = \frac{pc}{x''} = \frac{2aq}{2x'} = \text{const},$$

где x' и x'' ($x'' = 2x'$) — соответственно значения полного реактивного сопротивления при частотах f_1 и f_2 .

Благодаря повышению U_c и E коэффициент устойчивости увеличился вдвое. Это следует из рассмотрения выражения для максимальной электромагнитной мощности двигателя в зависимости от напряжения.

Действительно, из выражения (64) для электромагнитной мощности (§ 97)

$$P_a = m \frac{E}{z_a} [U \cos (\psi_k - \theta) - E \cos \psi_k]$$

получаем для данного возбуждения при $\theta = \psi_k$ максимум его значения

$$P_{a \max} = m \frac{E}{z_a} (U - E \cos \psi_k). \quad (137)$$

Это выражение достигает максимума при $E = \frac{U}{2 \cos \psi_k}$. Отсюда получим выражение для наибольшей максимальной мощности

$$P_{a(\max) \max} = m \frac{U^2}{4r_a}.$$

Максимальный вращающий момент определяется путем деления выражения для $P_{(\max) \max}$ на угловую скорость ротора. При увеличении приложенного напряжения вдвое максимальная мощность возрастает в четыре раза, как это явствует из последнего выражения. Вместе с тем, благодаря увеличению частоты, угловая скорость возрастает вдвое, в силу чего будет иметь место увеличение максимального момента в два раза.

Следует отметить, что активное сопротивление в цепи синхронного двигателя сильно влияет на значение его максимального вращающего момента.

В синхронных двигателях малой мощности величины x и r не особенно сильно отличаются друг от друга и поэтому величины U и E при $P_{a(\max) \max}$ также довольно близки друг к другу (это следует из выражения для $E = \frac{U}{2 \cos \psi_k}$).

Если напряжение U_c оставить неизменным, а увеличить вдвое частоту при $M = \text{const}$, то получим диаграмму напряжений Oap , в которой $E = Op$ увеличится вдвое, а $U_{\partial a} = \text{const}$. Реактивное падение напряжения $Ix = ap$ сильно возрастет благодаря появлению реактивного упреждающего тока. Результатом этого будет увеличение джоулевых потерь и уменьшение коэффициента мощности. Характер изменения коэффициента устойчивости кроме

указанного зависит еще от соотношения между r и x . Э. д. с. E с изменением частоты будет расти, но одновременно будет расти и x , а следовательно, увеличиваться угол ψ_k , в результате чего величина $P_{a \max}$ претерпит некоторое изменение, асимптотически приближаясь к постоянному значению. Если предположить, что $P_{a \max}$ остается неизменным, то кривая снижения максимальных значений моментов в зависимости от возрастания скорости двигателя будет представлять собой гиперболу. В действительности указанная кривая несколько отстает от гиперболы благодаря изменению мощности $P_{a \max}$. В такой же зависимости будет падать и коэффициент устойчивости.

В схемах синхронной связи при $U = \text{const}$ двигатель в случае $f = 0$ оказывается в положении короткого замыкания, так как величина тока ограничивается только омическим сопротивлением обмоток. Статический момент (максимальное его значение), развиваемый двигателем, оказывается наибольшим из возможных моментов в двигателе, равно как и поглощаемая двигателем мощность.

Электромагнитная мощность, передаваемая со статора на ротор, при покое двигателя равна нулю.

При частоте $f \neq 0$, несмотря на растущую до известного предела мощность, значение максимального момента будет падать, так как ток двигателя будет сдвигаться по фазе и уменьшаться по величине.

Примерная кривая максимальных моментов, в зависимости от скорости двигателя, т. е. частоты, показана на рис. 135, из которого видно, что изменение момента происходит по кривой, близкой к гиперболу.

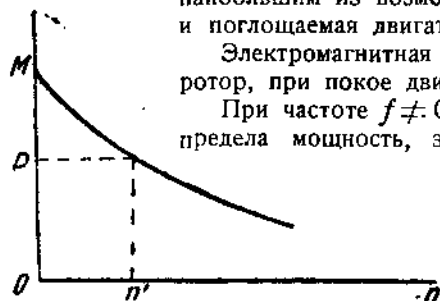


Рис. 135.

Указанное обстоятельство ограничивает скорость передачи при некотором заданном моменте. Так, например, для некоторого момента OP максимальная скорость, при которой двигатель выпадает из синхронизма, будет равна On' . Если обратиться к выражению (137) для $P_{a \max}$, то можно отметить, что нарастание мощности будет тем интенсивнее, чем больше r по сравнению с x . Результатом более интенсивного нарастания будет более пологая кривая максимальных моментов, позволяющая получить большие скорости передачи для одних и тех же моментов. Поэтому в установках с $U = \text{const}$ и небольшими мощностями двигателей в цепь последних ставят балластные омические сопротивления, которые одновременно ограничивают ток при положении покоя двигателя и делают кривую моментов более пологой.

Обратимся вновь к рис. 134 и предположим, что имеет место режим работы c , т. е.

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{f_2}{f_1}.$$

Для получения нормальной работы двигателя надлежит напряжение регулировать согласно соотношению

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2^2}{f_1^2}.$$

Если, как и ранее, мы увеличим частоту вдвое и, кроме того, величину потока также вдвое, причем за исходную диаграмму возьмем диаграмму Oaq , то для новой частоты будем иметь диаграмму Obs , отрезки Ob и Os которой соответственно в четыре раза более отрезков диаграммы Oaq .

Мощность, развиваемая двигателем, должна возрасти в отношении

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{f_2^3}{f_1^3}.$$

В нашем случае это составит восьмикратное увеличение мощности.

Обратимся к выражению (136) для P .

При исходном режиме мощность была равна

$$P_1 = \frac{U_c}{x} \cdot aq.$$

При удвоенной частоте можем написать, выражая новые U_c и x в долях от первоначальных:

$$P_2 = \frac{4 U_c}{2x} \cdot bs;$$

так как $bs = 4aq$, то в результате получим:

$$P_2 = \frac{4 U_c}{2x} \cdot 4aq = 8 \frac{U_c}{x} \cdot aq = 8 P_1.$$

Полученные результаты подтверждают справедливость приведенной на рис. 134 диаграммы и общих формул для получения нормальной работы синхронного двигателя:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \cdot \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}.$$

Очевидно, что величина тока в этом случае увеличится вдвое:

$$I_2 = \frac{4aq}{2x} = 2I_1,$$

а коэффициент мощности останется неизменным. Точно таким же образом можно получить диаграмму и для случая

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{f_1}{f_2}.$$

Следует отметить, что скорость векторов диаграммы Oaq и диаграмм Ocp и Obs различна, благодаря различной частоте, и поэтому мы можем рассматривать лишь мгновенное совпадение векторов при различной скорости их вращения.

Посмотрим теперь, как изменяются потери в двигателе с изменением скорости его вращения в случае постоянства момента нагрузки. Для этого режима поток остается примерно постоянным, равно как и ток якоря. Поэтому джоулевы потери в обмотке последнего и в обмотке возбуждения остаются без изменения. Потери на гистерезис изменяются пропорционально первой степени частоты:

$$P_{h2} = F_{h1} \left(\frac{f_2}{f_1} \right).$$

Потери на токи Фуко — пропорционально квадрату частоты:

$$P_{f2} = P_{f1} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2.$$

Наконец потери на трение можно считать пропорциональными 1,5 степени скорости вращения:

$$P_{m2} = P_{m1} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^{1.5}$$

При работе двигателя от сети с постоянной частотой с изменением отдаваемой им мощности изменялись пропорционально квадрату тока потери в меди, а остальные потери были постоянны. Таким образом в одном случае переменными являются потери в железе и механические, а в другом — в меди. Поэтому к. п. д. в функции от мощности при регулировании числа периодов и $M = \text{const}$ довольно мало отличается от нормального к. п. д. при постоянной частоте. Так как сумма потерь в меди и железе растет с увеличением частоты, то двигатель должен быть рассчитываем для наибольшей частоты, при которой ему придется работать.

127. Работа реактивного двигателя с вращающимся полем от сети с переменной частотой. Условия для осуществления нормальной работы реактивного двигателя остаются теми же, что и для двигателя с возбуждением, и могут быть выражены той же формулой:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$$

Однако в случае реактивного двигателя, так же, как и в случае асинхронного двигателя, изменение потока Φ происходит автоматически с изменением напряжения на зажимах двигателя. В частности при $M = \text{const}$ поток остается постоянным при увеличении f и соответственном увеличении U .

Зависимость напряжения, потока, тока и др. от числа оборотов двигателя при регулировании напряжения по приведенной выше формуле для трех характерных режимов работы изображена соответственно на рис. 136, а, б, с.

Кривые напряжения U на диаграммах указанного рисунка начинаются из некоторой точки b при $f = 0$, так как при положении

покоя возбужденных двигателей необходимо некоторое минимальное напряжение Ob для создания потока в машине, удерживающего двигателя в синхронизме при $f = 0$. Приведенные характеристики справедливы и для двигателя с возбуждением.

Обычно реактивные двигатели работают от источников переменного тока переменной частоты, но постоянного напряжения. Поэтому поток в реактивном двигателе с увеличением частоты будет уменьшаться, как во всяком индукционном аппарате. Если момент нагрузки $M_n = \text{const}$, то должна увеличиваться активная составляющая тока и сдвиг между выступами ротора

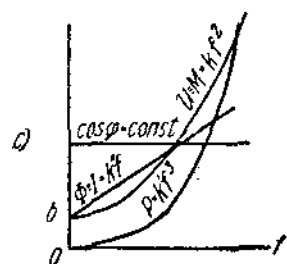
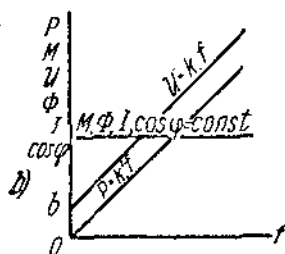
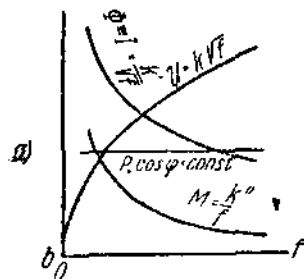


Рис. 136.

осью вращающегося потока статора должен увеличиваться. Максимальный момент вращения двигателя с увеличением скорости будет уменьшаться по кривой, близкой к гиперболе. Характер ее изменения (большой или меньший наклон) будет зависеть от параметров двигателя (x и r). Для получения наименьшего наклона кривой максимальных моментов, как уже отмечалось, в цепь якоря включают балластные сопротивления, ограничивающие в положении покоя ток в обмотке статора. Однако при введении добавочных сопротивлений нужно стремиться не увеличивать ощутимо общее значение полного сопротивления z при нормальной скорости вращения. Следует отметить, что реактивные двигатели с нормальной обмоткой статора машин переменного тока питаются от простого коллектора-переключателя, преобразующего постоянный ток в ступенчатый переменный. Это обстоятельство несколько увеличивает потери от высших гармонических. В остальном в их работе нет существенной разницы по сравнению с двигателем, питаемым синусоидальным переменным током.

128. Работа синхронного двигателя с явновыраженными полюсами на статоре от сети с переменной частотой. Двигатели с явновыраженными полюсами на статоре (двигатель Сперри, система Викакса и др.), вернее на якоре (в системе Викакса, например, якорем является ротор), имеют пульсирующие поля, сдвинутые в пространстве и во времени на некоторый угол (пространственный и временной). Указанные поля образуются поочередным включением отдельных полюсов в сеть постоянного тока при помощи коллектора-переключателя. Процессы, происходящие при указанных переключениях, можно рассматривать приближенно как работу переменного тока в многофазной цепи или же несколько более точно как картины, имеющие место при включении и выключении постоянного тока в простом контуре с неизменными R и L . В основе рассмотрения переходных процессов в последнем лежит дифференциальное уравнение

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U, \quad (138)$$

являющееся отображением того факта, что во время перехода цепи от одного состояния к другому приложенное напряжение U должно уравнивать напряжения, возникающие внутри контура, а именно активное падение напряжения Ri и напряжения самоиндукции $L \frac{di}{dt}$.

Для уяснения картины, имеющей место при включении контура с R и L (в данном случае обмоток одной пары полюсов двигателя) в цепь постоянного тока, рассмотрим сначала несколько более простой случай — выключение указанного контура из цепи постоянного тока путем замыкания контура накоротко. Таким образом до момента этого замыкания по контуру, присоединенному к источнику постоянного тока, проходил некоторый ток I . В момент осуществления короткого замыкания (момент $t=0$ для переходного процесса) можем считать, что начальный ток i_0 в короткозамкнутом контуре еще равен I .

Так как при коротком замыкании приложенное напряжение равно нулю, то приведенное выше дифференциальное уравнение примет вид:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0. \quad (139)$$

Его можно представить следующим образом:

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = 0. \quad (140)$$

Для интегрирования разделим переменные i и t :

$$\int \frac{di}{i} + \frac{R}{L} \int dt = 0.$$

Проинтегрировав это выражение, получим:

$$\ln i + \frac{R}{L} t = k = \ln I. \quad (141)$$

Очевидно, что постоянная интегрирования k должна быть равной $\ln I$. Иначе для момента времени $t=0$ не было бы соблюдено указанное выше равенство $i_0 = I$.

Далее можно написать

$$\ln \frac{i}{I} = -\frac{R}{L} t, \quad (142)$$

откуда для изменения тока i в контуре, в зависимости от времени, истекшего с момента осуществления короткого замыкания, можно написать:

$$i = Ie^{-\frac{R}{L}t} = Ie^{-\frac{t}{T}}, \quad (143)$$

где e — основание натуральных логарифмов, а $T = \frac{L}{R}$ — постоянная времени контура тока. Полученное уравнение представлено графически на рис. 137,а, из которого видно, что в каждом короткозамкнутом простом контуре сила тока затухает по показательной кривой. Скорость затухания определяется исключительно постоянной времени $T = \frac{L}{R}$. Следует отметить, что процесс затухания происходит одинаково — проходил ли по контуру до короткого замыкания постоянный или переменный ток, так как I (ток в начальный момент затухания) представляет собой то мгновенное значение тока, которое имеет место в контуре в момент коммутации.

При $t = \infty$ ток $i = 0$.

При $t = T = \frac{L}{R}$ ток i будет иметь значение

$$\frac{i}{I} = e^{-1} = \frac{1}{2,718} = 0,368.$$

При $t = 2T$ ток $i = 0,135 I$, а при $t = 3T = 0,05 I$.

Затухание тока происходит тем скорее, чем больше сопротивление и тем медленнее, чем больше самоиндукция контура.

Теперь перейдем к несколько более сложному случаю — включению простого контура (обмоток пары полюсов двигателя) на источник постоянного тока.

В момент включения ($t=0$) начальный ток $i_0=0$.

Дифференциальное уравнение контура будет иметь три члена

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U. \quad (144)$$

Устанавливающийся ток i в контуре можно разложить на два слагающих: $i' + i''$, позволяющих представить указанное дифференциальное уравнение в виде двух независимых дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di'}{dt} + Ri' &= U, \\ L \frac{di''}{dt} + Ri'' &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (145)$$

Очевидно, что сумма этих уравнений дает первоначальное дифференциальное уравнение,

Для решения первого уравнения можно взять столь большой промежуток времени, что ток i' в контуре станет неизменным (установившимся), т. е.

$$i' = \frac{U}{R} = I,$$

так как

$$\frac{di'}{dt} = 0.$$

Вторая слагающая i'' тока i представляет собой как бы ток переходного процесса в короткозамкнутом контуре; поэтому решение второго дифференциального уравнения будет иметь вид:

$$i'' = ke^{-\frac{R}{L}t}. \quad (146)$$

Теперь надлежит определить постоянную k , значение которой зависит от специфических условий данного процесса. Уже отмечалось, что в началь-

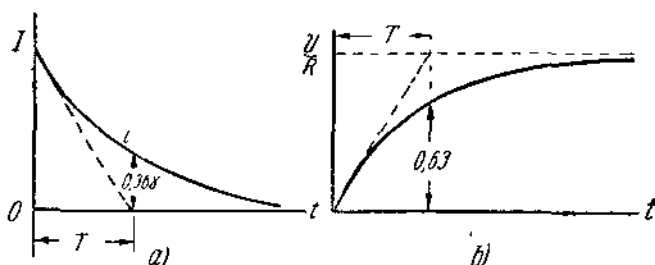


Рис. 137.

ный момент процесса включения, т. е. при $t=0$ ток $i_0=0$. Очевидно, что и в этом случае он должен иметь две составляющие: i' и i'' , т. е.

$$i_0 = \frac{U}{R} + k \cdot 1 = 0,$$

что дает

$$k = -\frac{U}{R}.$$

Выражение для i , таким образом, будет иметь вид:

$$i = i' + i'' = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = I \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (147)$$

Изменение тока, согласно этому уравнению, будет происходить по опрокинутой показательной (экспоненциальной) кривой, изображенной на рис. 137, б. Следовательно, ток возрастает не мгновенно, а постепенно от нулевого значения до своего установившегося значения $I = \frac{U}{R}$. Нарастание будет происходить тем медленнее, чем больше постоянная времени $T = \frac{L}{R}$.

Таким образом, как и для случая короткого замыкания контура, получим, что по истечении времени t с момента включения $t = T$ ток i достигнет значения:

$$\frac{i}{I} = 1 - e^{-1} = 0,632 = 63,2\%.$$

При $t = 2T$ значение тока i будет составлять 86,5% от конечного значения тока I , а при $t = 3T$ ток i практически уже равен I (составляет 95%).

Пусть, например, имеет место включение обмотки полюса со следующими данными: число витков 2000, сила тока 10 А, магнитный поток $\Phi = 6 \cdot 10^6$.

Коэффициент самоиндукции может быть определен по формуле

$$L = \frac{w\Phi}{I} = \frac{2000 \cdot 6 \cdot 10^6}{10} \cdot 10^{-8} = 12 \text{ Н.}$$

При $R = 11 \Omega$ постоянная времени будет равна

$$T = \frac{12}{11} = 1,09 \text{ сек.}$$

Таким образом ток i достигнет установившегося значения через промежуток времени $t = 3T \approx 3,3$ сек. Для обмотки магнитов двигателей, применяемых в схемах синхронной связи, постоянная времени будет значительно меньше, так как активное сопротивление обмоток его полюсов довольно велико благодаря малой мощности двигателей.

Для нахождения постоянной времени по экспериментально полученным кривым изменения тока при включении можно либо провести касательную k в точке кривой при $t = 0$, или же, зная, что при $t = T$ ток $i = 0,632 I$, отложить последнее значение тока на кривой (см. рис. 137, б).

Если скорость ключа-коллектора такова, что включение каждой пары полюсов происходит на промежуток времени меньший, чем $t = 3T$, то ток в обмотках полюсов не будет достигать своего максимального значения, возможного при данном напряжении U , а именно $I = \frac{U}{R}$. Очевидно, что с уменьшением промежутка включения, т. е. с увеличением скорости передачи максимальное значение тока в обмотке начнет уменьшаться, что вызовет соответственное уменьшение рабочего потока, а, следовательно, максимального вращающего момента. Уменьшение момента в синхронном двигателе с явно выраженными полюсами на статоре будет происходить примерно по тому же закону, как и для других синхронных двигателей (см. рис. 135), так как по существу процессы, происходящие во всех этих двигателях, одни и те же. Уменьшение величины тока при уменьшении периода включения можно рассматривать как результат увеличения реактивного сопротивления с увеличением частоты.

Для рассматриваемых двигателей желательно, чтобы постоянная времени имела наименьшее значение, так как это позволит при том же рабочем моменте повысить скорость передачи (кривая моментов станет более пологой). Поэтому активное сопротивление цепи обмоток двигателя часто искусственно повышают путем включения добавочных (балластных) сопротивлений (тот же прием, что и для ранее рассмотренных двигателей). Однако нужно также принимать во внимание вытекающее отсюда уменьшение максимальной силы тока, для поддержания которой приходится повышать напряжение на ключе. Таким образом наивыгоднейшее решение вопроса заключается в согласовании указанных двух противоречащих друг другу обстоятельств.

Следует отметить, что при выполнении сердечников полюсов двигателя из сплошного железа нарастание потока включенной в цепь постоянного тока обмотки еще замедлится за счет возникновения в сплошной железной массе вторичных токов. Поэтому надлежит применять сердечник из листового железа.

Остановимся теперь вкратце на процессе размыкания цепи обмотки полюса, приключенной к напряжению постоянного тока. В короткий промежуток времени (период размыкания) ток, составлявший до коммутации $i_0 = I = \frac{U}{R}$, должен быть доведен до своего нового установившегося значения $i'_\infty = 0$, благодаря чему должен возникнуть ток с начальным значением $i''_0 = i_0 - i'_\infty = I$.

Одновременно с этим сопротивление контура доводится до значения $R = \infty$.

Ток затухает в чрезвычайно короткий промежуток времени, так как постоянная времени $T = \frac{L}{R}$ имеет бесконечно малое значение благодаря большому сопротивлению разрядного промежутка. Если считать, что сопротивление контура $R = \infty$ устанавливается мгновенно, то теоретически на зажимах разрываемых контактов в первый момент выключения должно иметь место напряжение, равное $e'' = i''_0 \cdot R = \infty$. В действительности же, благодаря довольно постепенному повышению сопротивления разрываемого контакта, наблюдается лишь большее или меньшее повышение напряжения, что зависит от быстроты размыкания контура. Большие повышения напряжения могут вызвать пробой в обмотках полюсов.

Для уменьшения этого напряжения, а главное для уменьшения искрения при разрыве цепи, применяют конденсаторы, включаемые параллельно размыкаемой обмотке или параллельно разрываемым контактам.

Емкость конденсатора C_1 должна быть значительно больше емкости искрового промежутка C_n . Благодаря тому, что $\frac{1}{\omega C_n} > \frac{1}{\omega C_1}$, будет проходить заряд конденсатора и соответственно уменьшение силы тока, а следовательно, искрения в промежутке между разрываемыми контактами.

Величину тока, поддерживаемого в искровом промежутке, определяет возникшее на разомкнутых контактах напряжение. Если сопротивлением контура пренебречь, то можно указанное напряжение вычислить следующим образом.

Созданная током I в самоиндукции L магнитная энергия, как известно, равна $A_m = \frac{1}{2} L I^2$. Если в контуре нет потерь, то после выключения эта энергия должна зарядить конденсатор, перейдя в электростатическую:

$$A_c = \frac{1}{2} C E^2. \quad (148)$$

Так как мы пренебрегли потерями в контуре, то можем написать:

$$\frac{1}{2} CE^2 = \frac{1}{2} L P. \quad (149)$$

Отсюда определяем наивысшее напряжение, возникающее между контактами после их размыкания:

$$E = I \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (150)$$

Следовательно, для получения небольших напряжений нужно брать конденсаторы значительной емкости.

Когда контур обладает большим омическим сопротивлением, то действительное значение E меньше, чем получается из формулы (150). В этом случае E должно подсчитывать по следующей формуле:

$$E = I \sqrt{\frac{L}{C}} e^{\frac{\pi}{4} R \sqrt{\frac{C}{L}}}. \quad (151)$$

Смотря по отношению между омическим сопротивлением и колебательным сопротивлением контура величина E может оказаться почти на 50% ниже, чем это получается из формулы (150).

Наличие разрываемых контактов в простом коллекторе-переключателе ограничивает применение этого типа в отношении мощности, так как для безыскровой коммутации в системах с большой магнитной энергией, накапливаемой в реактивном сопротивлении полюсов, пришлось бы применять конденсаторы очень больших размеров.

Если учесть постепенность изменения сопротивления разрываемого контакта, то напряжение выключения для выключателя со скользящим контактом должно определяться по следующей формуле:

$$E_s = \frac{U}{1 - \frac{L}{r\tau}}, \quad (152)$$

где U — напряжение источника постоянного тока, L — самоиндукция контура, τ — время размыкания, r — сопротивление разрываемого контакта.

Таким образом большая индуктивность L и малое время размыкания τ сильно увеличивают напряжение выключения по отношению к рабочему напряжению.

Условием получения конечного напряжения при выключении является требование, чтобы время размыкания контакта было

$$\tau > \frac{L}{r}.$$

Оно должно быть больше постоянной времени самих контактов, включая в нее общую индуктивность контура. Соблюдение этого условия требует достаточной продолжительности размыкания и подбора надлежащего материала для контактов, при котором их поверхности обладали бы большим сопротивлением. С точки зрения теплового эффекта время размыкания желательно уменьшить, равно как и контактное сопротивление, причем контакты должны быть так рассчитаны, чтобы они могли, благодаря своей

теплоемкости и внутренней теплопроводности, воспринимать работу выключения не плавясь, т. е. не покрываясь окалиной. Наиболее подходящим в этом отношении материалом является медь. Таким образом вопрос работы коллектора-переключателя в отношении безыскровой коммутации довольно сложен и, кроме того, при значительных мощностях практически трудно разрешим.

ГЛАВА XXI.

СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ЖЕСТКОЙ СВЯЗЬЮ С ОСЬЮ.

129. Введение. К синхронным двигателям могут быть отнесены и двигатели с жесткой связью с осью, применяющиеся в устаревших в настоящее время системах Гейслера и Эриксона. Так как эти системы имеют еще некоторое распространение, то надлежит на них вкратце остановиться.

Под двигателем с жесткой связью с осью понимается электромагнитный двигатель с одним или несколькими электромагнитами, действие которого основано на периодическом притягивании последними якорей двигателя, механически связанных с рабочим валом.

Притягивание осуществляется за счет периодического включения обмоток электромагнитов в электрическую цепь постоянного

тока или питания их переменным током низкой периодичности. Главным недостатком подобных двигателей с возвратно-поступательным или качательным движением якоря является их малая скорость, имеющая место благодаря инерции движущихся частей и большой самоиндукции обмоток электромагнитов.

Движение оси в подобных двигателях происходит скачками синхронно с импульсами тока, поступающими в обмотки электромагнитов, подобно тому как это имеет место в синхронных двигателях с явно выраженными полюсами на якоре (двигатели Сперри, Викакса и др.).

130. Двигатели в системе Гейслера. Двигатель системы Гейслера, изображенный схематически на рис. 138, состоит из трех расположенных под углом в 120° друг к другу электромагнитов $\mathcal{A}_1$, $\mathcal{A}_2$, $\mathcal{A}_3$, предназначенных поочередно притягивать якоря b_1 , b_2 , b_3 . Последние шарнирно связаны при помощи тяг с кривошипом B вала двигателя.

При каждом притягивании якоря к электромагниту вал поворачивается на 120° . Таким образом три замыкания дают поворот кривошипа на 360° .

Одни концы трех обмоток электромагнитов (трехфазная система) соединены в общую точку, к которой подведен один полюс (обычно минус) источника постоянного тока. Другие три конца соединены при помощи линии 1, 2, 3 с неподвижными щетками a_1 , a_2 , a_3 , установленными на вращающемся переключателе в виде барабана, снабженном токопроводящим контактом, соединенном с другим полюсом источника постоян-

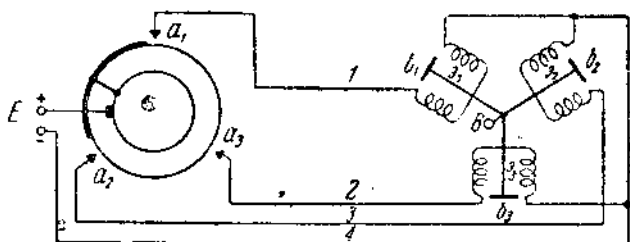


Рис. 138.

ного тока. Остальная часть барабана переключателя выполнена из изолирующего материала. При вращении переключателя от руки или при помощи серводвигателя указанный контакт приходит в поочередное соприкосновение со щетками a_1 , a_2 , a_3 , включая соответственные обмотки электромагнитов, притягивающих поочередно свои якоря. Для реверсирования нужно вращать переключатель в обратную сторону. Тогда порядок следования импульсов в двигателе также станет обратным.

Одному обороту переключателя соответствует один оборот вала двигателя.

Таким образом рассматриваемый двигатель представляет собой разновидность трехфазного синхронного двигателя, причем указанный переключатель преобразовывает постоянный ток в импульсы тока, сдвинутые по времени на 120° и представляющие собой своеобразный трехфазный ток. Двигатель Гейслера, так же как и обычный синхронный двигатель, имеет три обмотки, соединенные в звезду и сдвинутые в пространстве на 120° . Работа двигателя с электрической точки зрения и его характеристики подобны работе синхронных двигателей с эластичной связью с осью и выступающими полюсами на якоре.

Рассмотренный выше вопрос о включении полюсов указанных двигателей в цепь постоянного тока при меняющемся числе оборотов переключателя (§ 128) целиком относится и к двигателю Гейслера. Таким же образом с увеличением скорости ключа ток в обмотках будет уменьшаться, что вызовет уменьшение вращающего момента. Очевидно, что и в этом случае нарастание тока в электромагнитах будет определяться уже известной формулой:

$i = I(1 - e^{-\frac{t}{T}})$. Основная разница между этими двигателями заключается в связи с осью. Если во всех выше рассмотренных двигателях при увеличении момента нагрузки ось полюсных выступов сдвигалась на некоторый угол θ относительно оси потока, то в двигателе Гейслера угол $\theta = 0$ для всех значений момента, меньших опрокидывающего момента. Это свойство определяется тем, что якорь двигателя Гейслера вилотную притягивается к электромагниту, удерживающему его в неподвижном положении до переключения тока в другой электромагнит или до возникновения опрокидывающего момента.

Таким образом характеристика статических моментов двигателя представляет собой прямую, совпадающую с осью ординат (угол θ в пределах синхронизма равен нулю). Следовательно, в этом отношении двигатель Гейслера, как и все двигатели с жесткой связью с осью, представляет собой идеальный синхронный двигатель. Однако целый ряд недостатков органического свойства совершенно не позволяет ему конкурировать с имеющими менее совершенную характеристику синхронными двигателями с эластичной связью с осью.

Для удержания в неизменном положении оси двигателя при отключении его от сети и тем самым для устранения возможных рассогласований между параллельно включенными приемниками на оси устанавливается храповичок с пружинящей собачкой. Храповичок имеет три зубца в соответствии с тремя фиксированными положениями оси двигателя за один оборот. При остановке оси в каком-либо из этих положений собачка, попадая в углубление между зубцами храповичка, удерживает ось от случайных сдвигов. Очевидно, что при работе двигателя такое тормозное приспособление является дополнительной нагрузкой на ось, так как для ее поворачивания необходимо с известным усилием отодвинуть при помощи зубцов храповичка пружинящую собачку.

Основным недостатком двигателя Гейслера является весьма ограниченная скорость системы, определяемая инерцией возвратно-поступательно движущихся якостей.

Этот недостаток усугубляется тем, что скорость рабочего механизма, приводимого от двигателя, должна быть значительно снижена по сравнению со скоростью вала двигателя, что объясняется требованиями точности передачи. Действительно, точность передачи на валу двигателя составляет 120° , так как вал движется скачками на этот угол. Очевидно, что для уменьшения шага передачи у исполнительного механизма (например стрелки) необходимо между валом последнего и валом двигателя поставить зубчатую передачу, уменьшающую скорость движения, но повышающую точность передачи.

Мощность двигателя Гейслера весьма невелика ($3 \div 4$ гдм), что является достаточным лишь для вращения двух стрелок, связанных между собой системой зубчатых шестерен (для получения одновременно двух различных шагов передачи).

Мощность ограничивается увеличением самоиндукции обмотки и искрения ключа.

К недостаткам системы Гейслера нужно отнести необходимость довольно частого согласования ключа и двигателей в конечных отсчетах или же условных отсчетах. Рассогласование может произойти по следующим причинам: 1) проворачивание ключа при отсутствии напряжения в линии, 2) заедание в механической передаче или в храповом механизме, 3) чрезмерно большие скорости передачи. Габариты в таком двигателе использованы нерационально, потому что конструкция не имеет компактности. Система довольно чувствительна к колебаниям напряжения. Скорость передачи составляет не более 15 импульсов в секунду, что дает наибольшее возможное число оборотов в минуту 300, обычно же рабочая скорость составляет 6 импульсов в секунду, т. е. 120 оборотов в минуту.

Благодаря наличию переключателя на командном посту, число параллельно включенных принимающих приборов по причинам искрения на ключе не может быть велико.

К достоинствам передачи нужно отнести устойчивость положения стрелок при остановке работы ключа, простоту обслуживания и легкость обучения персонала и, наконец, как уже отмечалось, отсутствие сдвига между осями ротора и поля статора (нулевое значение угла θ). Однако весьма малая мощность и ограниченная скорость передачи делают систему Гейслера при современных требованиях к передаче управления на расстоянии весьма мало пригодной. Поэтому новые установки ею не снабжаются, в старых же установках она кое-где сохранилась.

131. Двигатели в системе Эриксона. Другим типом синхронного двигателя с жесткой связью с осью является двигатель синхронной передачи системы Эриксона. Эта система, так же, как и система Гейслера, является устаревшей по тем же причинам. В двигателе Гейслера якоря при помощи тяг и кривошипа связаны непосредственно с валом двигателя. В системе Эриксона эта связь осуществляется через механический дифференциал, позволяющий производить реверсирование рабочего вала при однофазном переменном токе, питающем обмотки двигателя. На рис. 139 схематически изображен двигатель Эриксона, состоящий из двух электромагнитов $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$, снабженных каждый двумя обмотками и качающимися вокруг точек O_1 и O_2 якорями b_1 и b_2 . Один конец каждого якоря нахо-

дится под воздействием пружины p_1 или p_2 , а другой, снабженный рабочим пальцем, — под воздействием электромагнита. Пальцы якорей упираются в зубья храповых колес k_1 и k_2 , свободно сидящих на оси N двигателя и скрепленных с боковыми коническими колесами c_1 и c_2 механического дифференциала. Внутренние конические колеса c_3 и c_4 вращаются на осях, жестко скрепленных с валом двигателя. Если конические колеса

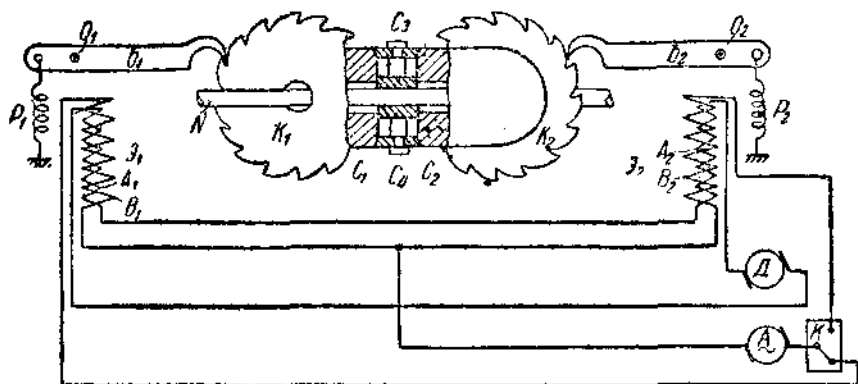


Рис. 139.

c_1 и c_2 вращаются в противоположные стороны с одинаковой скоростью, то вал N будет неподвижен, так как колеса c_3 и c_4 будут вращаться лишь вокруг своих осей. При одном же неподвижном колесе c_1 или c_2 вал N придет во вращение благодаря тому, что колеса c_3 и c_4 будут катиться по неподвижному коническому колесу c_1 или c_2 . Применением двух электромагнитов $Э_1$ и $Э_2$ и дифференциала осуществляется реверсирование вала N , а именно: для вращения вала в одном направлении работает один электромагнит, а для вращения его в противоположном направлении работает другой электромагнит.

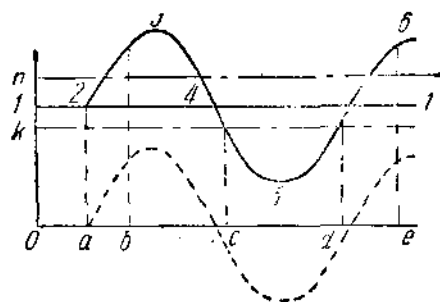


Рис. 140.

Таким образом мощность двигателя определяется мощностью лишь одного электромагнита. Поэтому использование такого двойного двигателя оказывается весьма плохим (по существу имеются два одинаковых двигателя, что увеличивает

вес системы и ее габариты, не говоря уже о повышенной стоимости). Одна из обмоток каждого электромагнита, а именно обмотки A_1 и A_2 , включена в цепь источника постоянного тока D (обычно обмотки A_1 и A_2 обоих электромагнитов соединяются последовательно). Каждая из двух других обмоток B_1 и B_2 может быть включена в цепь специального источника переменного тока A . Включение той или другой обмотки зависит от желаемого направления вращения вала N и осуществляется при помощи переключателя K .

Работа двигателя происходит следующим образом. В сердечнике работающего электромагнита имеют место два потока — неизменный по величине, создаваемый обмоткой постоянного тока, и переменный, создаваемый переменным током. Оба потока (рис. 140), складываясь или вычитаясь, создают результирующий пульсирующий поток, который при своем максимальном значении притягивает якорь, заставляя храповое колесо передвигаться на один зубец. При минимальном значении потока пружина p_1 или p_2 преодолевает притягивающее действие ослабленного потока и отводит якорь в исходное положение.

На рис. 140 линия 1—1 изображает поток, создаваемый постоянным током; синусоидальная линия, обозначенная пунктиром, — поток от переменного тока и, наконец, линия 1-2-3-4-5-6 — суммарный поток электромагнита. Момент времени, в который происходит притяжение якоря, зависит от величины магнитного потока и силы отбивной пружины p_1 или p_2 (рис. 139).

В случаях параллельной работы нескольких передатчиков возможны расхождения, если включение и выключение производится в произвольный момент и отбивные пружины отдельных приемников не отрегулированы абсолютно одинаково, что получить в практических условиях весьма затруднительно.

Пусть имеются два двигателя с различными силами тяги отбивных пружин, одна из которых соответствует (рис. 140) потоку Ol , а другая — потоку Ok . Следовательно, если включен один постоянный ток (линия 1—1, то якорь одного двигателя окажется притянутым, а другой отпущенным, так как в одном случае поток Ol больше потока Ok , потребного для притягивания пружины, а в другом меньше потока Ol , соответствующего силе тяги пружины второго приемника.

Вообще же при включении одного постоянного тока якоря должны быть притянуты. Допустим, что включение переменного тока произошло в момент a . Тогда двигатель с большей силой тяги пружины притянется и сработает в некоторый момент b , передвинув храповое колесо на один зубец. Якорь второго двигателя будет притянутым до момента c . Далее, он отойдет и притянется и сработает в момент d . Вскоре после этого (в момент e) сработает второй раз первый двигатель. Таким образом двигатели разойдутся на угол, соответствующий одному зубцу.

Подобное расхождение может быть устроено при помощи специального реле с двумя обмотками, по одной из которых все время протекает переменный ток, создающий пульсирующий магнитный поток, а по другой — постоянный ток. Указанное реле и производит включение двигателей в момент, исключающий возможность расхождения.¹ Момент двигателя Эриксона достаточно велик, чтобы вращать отдельные детали какого-нибудь прибора. При покое вал двигателя находится в устойчивом положении, из которого вывести его при помощи внешнего усилия трудно.

К недостаткам двигателя следует отнести: 1) применение двух токов — постоянного и переменного (сложность оборудования, его высокая стоимость и т. д.); 2) чувствительность к колебаниям напряжения в сети; 3) чувствительность к повышенной нагрузке в цепи; 4) малую скорость передачи (10 замыканий в секунду); 5) возможность пропусков притягива-

¹ Подробнее см. А. А. Солодовников, *Элементы телемеханики*, 1931 г., стр. 137—139.

ния якоря (проскальзывание двигателя); 6) зависимость от продолжительности работы (пружины теряют настройку); 7) сложность обслуживания; 8) большой шум при работе.

Двигатель Эриксона работает с неизменной синхронной скоростью, от переменного тока обычно в 10 Нз. Следовательно, эта передача представляет собой систему, работающую с определенной скоростью, в отличие от большинства приведенных выше систем (в главе XIX разбиралось несколько типов синхронных двигателей, также работающих в сетях с неизменной частотой).

Здесь теперь возникает вопрос о точном повороте на небольшой угол ведомых осей, который в системах с переменной частотой осуществлялся небольшим поворотом ключа системы. В системе Эриксона шагом передачи является угол, соответствующий повороту храпового колеса на один зубец (весьма малая величина). Поэтому даже небольшой передаваемый угол может быть разбит на несколько шагов.

Для управления системой удобнее всего применить так называемую независимую установку угла (со следящим приводом), при которой двигатель на командном посту, а вместе с ним и ведомые двигатели, отрабатывают заданный угол при помощи следящей системы.¹

Для питания системы необходимо иметь агрегат, дающий постоянный ток и десятипериодный переменный. Это обстоятельство весьма усложняет систему. В настоящее время последняя по тем же причинам, что и система Гейслера, не изготавливается.

¹ Подробнее см. А. А. Солодовников. Элементы телемеханики, 1931 г., стр. 145—149.

ИНДУКЦИОННЫЕ МАШИНЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИХ В СХЕМАХ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ

А. ИНДУКЦИОННАЯ МАШИНА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ.

ГЛАВА XXII.

СИНХРОННЫЕ РЕЖИМЫ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ.

132. Введение. Схема синхронной связи может быть осуществлена на переменном токе неизменной частоты. Выше были разобраны передатчики и приемники схем, работающих на переменной частоте. Далее мы перейдем к рассмотрению режимов работы электрических машин в схемах синхронной связи на переменном токе неизменной частоты. В подобных схемах в качестве передатчика и приемника применяются машины, выполненные по типу асинхронных двигателей и работающие в режиме синхронной машины.

Схемы синхронной связи с асинхронными машинами называются также индукционными схемами.

Связь с ведомой осью в этих схемах, так же, как и в большинстве схем на переменной частоте, эластична, т. е. момент, развиваемый на валу, пропорционален углу θ , составленному осями первичной и вторичной систем.

Индукционные схемы синхронной связи получили весьма большое распространение благодаря высокой точности передачи, простоте устройства, легкости обслуживания и т. п. Если такая система работает в пределах одного оборота и непосредственно связана с управляемой осью (без передачи), то она оказывается обладающей весьма важным свойством — самосинхронизацией, позволяющей всем осям передатчиков и приемников автоматически устанавливаться в идентичное положение при включении системы в сеть переменного тока.

Уже отмечалось, что в индукционных схемах синхронной связи асинхронные машины работают в синхронном режиме, представляя собой по существу так называемую машину двойного питания, т. е. машину, у которой обмотки и статора и ротора присоединены к одной общей или отдельным сетям переменного тока.

Вместе с тем машина двойного питания как таковая непосредственно применяется в схемах синхронной связи в качестве электрического дифференциала, работающего за счет разности частот или фаз на статоре и роторе.

Машина двойного питания нашла также широкое применение для поддержания неизменным числа оборотов двигателей, синхронизации источников переменного тока и т. п. Поэтому, прежде чем перейти непосредственно к схемам синхронной связи с индукционными машинами, целесообразно рассмотреть работу индукционной машины двойного питания, теория которой является основой теории работы указанных схем.

В частности, выпадение приемников последних из синхронизма стоит

в непосредственной связи с асинхронными режимами машины двойного питания. Кроме того, как указывалось выше, последняя является своеобразным синхронным двигателем и электрическим дифференциалом, что позволяет, с одной стороны, применять ее в схемах синхронной связи переменной частоты в качестве приемника, а с другой — использовать как регулирующий орган для поддержания неизменности какого-либо режима работы установки. Весьма существенным также является применение машины двойного питания в индукционных схемах для осуществления сложных заданий (управление приемника от двух передатчиков, умножение или деление перемещений и т. п.).

133. Общие сведения о машине двойного питания. Индукционной машиной двойного питания в собственном смысле этого слова обычно называют трехфазную асинхронную машину с кольцами, у которой обмотки статора и ротора приключены к одной и той же сети. Порядок следования фаз на статоре и роторе при этом может быть установлен или одинаковый или различный, от чего свойства машины значительно меняются.

В более широком смысле под машиной двойного питания понимается машина переменного тока, у которой обмотки статора и ротора приключены к двум независимым источникам (генераторам) переменного тока различных частот. Последней формулировки мы и будем придерживаться, так как она, во первых, позволит охватить общей теорией целый ряд режимов работы индукционной машины, имеющих отношение к схемам синхронной связи, а во вторых, даст возможность установить связь с общей теорией всех машин переменного тока, ибо машина двойного питания может быть рассматриваема как общий случай машины переменного тока.¹ Подобное обобщение имеет существенное значение с точки зрения включения специальных режимов индукционной машины в общую классификацию режимов работы электрических машин переменного тока. До сих пор работа индукционных машин в схемах синхронной связи рассматривалась несколько обособленно, что не являлось благоприятным для развития ее теории.

Индукционная машина двойного питания, вне зависимости от того, присоединена ли она обмотками статора и ротора к одной сети или к двум различным сетям разной частоты, может иметь четыре основных режима, из которых два режима синхронных, а два — асинхронных.

Один синхронный режим и один асинхронный получаются при вращении полей статора и ротора в разные стороны, т. е. при неодинаковом порядке следования фаз на статоре и роторе. Два других режима (из указанных четырех) имеют место при вращении полей в одну сторону.

Собственно говоря, все эти режимы не являются обособленными друг от друга и имеют плавный переход от одного к другому (синхронные режимы — между собой и таким же образом асинхронные).

Очевидно, что рабочими режимами для схем синхронной связи являются синхронные режимы машины двойного питания, асинхронные же режимы представляют собой нежелательные, вынужденные отклонения от правильного функционирования синхронно работающих приборов.

Рассмотрением теории индукционного двигателя двойного питания мы свяжем схемы, работающие на переменной частоте, с индукционными схемами, так как указанный двигатель применяется в первых схемах в качестве приемника.

¹ См. статью В. Т. Касьянова. Журн. „Электричество“, 1931 г., № 21, вып. I, стр. 1189.

в непосредственной связи с асинхронными режимами машины двойного питания. Кроме того, как указывалось выше, последняя является своеобразным синхронным двигателем и электрическим дифференциалом, что позволяет, с одной стороны, применять ее в схемах синхронной связи переменной частоты в качестве приемника, а с другой — использовать как регулирующий орган для поддержания неизменности какого-либо режима работы установки. Весьма существенным также является применение машины двойного питания в индукционных схемах для осуществления сложных заданий (управление приемника от двух передатчиков, умножение или деление перемещений и т. п.).

133. Общие сведения о машине двойного питания. Индукционной машиной двойного питания в собственном смысле этого слова обычно называют трехфазную асинхронную машину с кольцами, у которой обмотки статора и ротора приключены к одной и той же сети. Порядок следования фаз на статоре и роторе при этом может быть установлен или одинаковый или различный, от чего свойства машины значительно меняются.

В более широком смысле под машиной двойного питания понимается машина переменного тока, у которой обмотки статора и ротора приключены к двум независимым источникам (генераторам) переменного тока различных частот. Последней формулировки мы и будем придерживаться, так как она, во первых, позволяет охватить общей теорией целый ряд режимов работы индукционной машины, имеющих отношение к схемам синхронной связи, а во вторых, даст возможность установить связь с общей теорией всех машин переменного тока, ибо машина двойного питания может быть рассматриваема как общий случай машины переменного тока.¹ Подобное обобщение имеет существенное значение с точки зрения включения специальных режимов индукционной машины в общую классификацию режимов работы электрических машин переменного тока. До сих пор работа индукционных машин в схемах синхронной связи рассматривалась несколько обособленно, что не являлось благоприятным для развития ее теории.

Индукционная машина двойного питания, вне зависимости от того, присоединена ли она обмотками статора и ротора к одной сети или к двум различным сетям разной частоты, может иметь четыре основных режима, из которых два режима синхронных, а два — асинхронных.

Один синхронный режим и один асинхронный получают при вращении полей статора и ротора в разные стороны, т. е. при неодинаковом порядке следования фаз на статоре и роторе. Два других режима (из указанных четырех) имеют место при вращении полей в одну сторону.

Собственно говоря, все эти режимы не являются обособленными друг от друга и имеют плавный переход от одного к другому (синхронные режимы — между собой и таким же образом асинхронные).

Очевидно, что рабочими режимами для схем синхронной связи являются синхронные режимы машины двойного питания, асинхронные же режимы представляют собой нежелательные, вынужденные отклонения от правильного функционирования синхронно работающих приборов.

Рассмотрением теории индукционного двигателя двойного питания мы свяжем схемы, работающие на переменной частоте, с индукционными схемами, так как указанный двигатель применяется в первых схемах в качестве приемника.

¹ См. статью В. Т. Касьянова. Журн. „Электричество“, 1931 г., № 21, вып. I, стр. 1189.

Следует отметить, что машину двойного питания иногда называют „асинхронной“ благодаря полной идентичности ее (не считая расчетных особенностей) в конструктивном отношении с обычной асинхронной машиной. Следует иметь в виду, что в отношении принципа действия указанная машина в равной мере принадлежит и к синхронным и к асинхронным машинам, что зависит от того режима работы, в котором она находится.

134. Схемы включения и принцип действия. Индукционная машина двойного питания, как уже отмечалось, подключается обеими своими обмотками к сети переменного тока (к одной или двум отдельным).

На рис. 141 изображены различные схемы включения машины двойного питания, причем на рис. 141, а имеет место включение при вращении полей в одну сторону и питании от одной сети, рис. 141, б — схема при вращении полей в разные стороны и питании от одной сети, и, наконец,

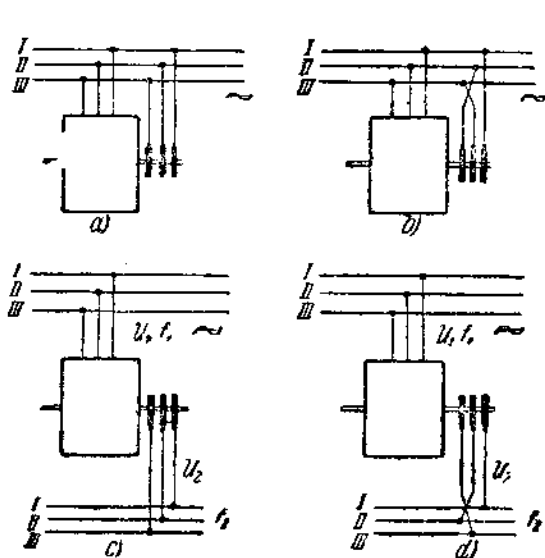


Рис. 141.

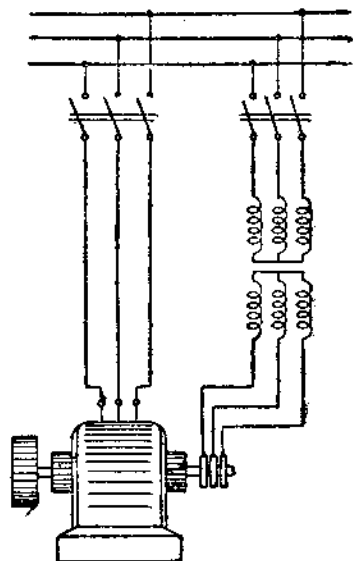


Рис. 142.

рис. 141, в и г — соответственно включения при вращении полей в одну и разные стороны и питании от двух различных сетей частот f_1 и f_2 и в общем случае разных напряжений, U_1 и U_2 . Очевидно, что при различных числах витков на статоре и роторе машины двойного питания присоединение одной из обмоток (например ротора) к общей сети должно производиться через трансформатор, подводящий к обмотке именно то напряжение, на которое она рассчитана (см. рис. 142).

При всех схемах включения, приведенных на рис. 141 и 142, могут иметь место как синхронные, так и асинхронные режимы, причем для получения синхронного режима машины необходимо, как и при обычной синхронной машине, произвести синхронизирование одной из сторон машины, например обмотки ротора с сетью, для чего надлежит развернуть ротор до синхронного числа оборотов, установить правильность фаз и т. п. Другая обмотка машины должна быть предварительно подключена к сети.

Очевидно, что необходимость в синхронизировании отпадает, если машина присоединена к сети с частотой, плавно меняющейся от нуля.

Конечно, схемы, представленные на рис. 141, а и б, могут быть осуществлены не только при параллельном присоединении обеих обмоток к сети, но также и при последовательном их соединении. Для этого одна из обмоток (обычно обмотка статора) должна иметь выведенными все шесть концов фаз обмоток для возможности последовательного соединения фазы статора с соответствующей ей фазой ротора. Принцип действия схем от этого не меняется. Изменяется лишь максимальный вращающий момент (уменьшается в четыре раза при одинаковых параметрах обмоток), так как напряжение, приходящееся на каждую из обмоток при последовательном их соединении, соответственно снижается (при одинаковых параметрах в два раза, при разных — пропорционально числу витков).

Непременным условием для действия любого электрического двигателя является неподвижность поля статора относительно поля ротора (закон электромагнитного взаимодействия). Последний именно и вращается за счет соблюдения этого основного условия. Если питание в машине подводится с двух сторон, то могущий быть установленным синхронный режим понуждает вращаться ротор со скоростью, соответствующей разности чисел оборотов полей относительно своих обмоток.

Так, например, в обычной синхронной машине с возбуждением постоянным током, которую также можно рассматривать как машину двойного питания, число оборотов поля статора относительно статора же равно $n_1 = \frac{f_1 60}{p}$ об/мин. Число оборотов поля ротора относительно ротора равно нулю, так как ротор возбуждается постоянным током ($f_2 = 0$). Число оборотов ротора n должно быть при синхронном режиме пропорционально разности частот $f_1 - f_2 = f_1$ и равно разности оборотов полей относительно своих обмоток, т. е. $n = n_1 - n_2 = \frac{f_1 60}{p} - 0 = n_1$. Благодаря этому поле ротора окажется неподвижным относительно поля статора, и двигатель будет работать в синхронном режиме. Подобное же условие необходимо и при $f_2 \neq 0$. Конечно, в этом случае синхронное число оборотов окажется другим.

В обычном асинхронном двигателе поля статора и ротора также неподвижны друг относительно друга, но ротор идет с асинхронной скоростью, так как двигатель получает питание с одной стороны и для приобретения вторичной м. д. с. должен вращаться со скольжением.

Пусть число оборотов поля статора относительно статора равно: $n_1 = \frac{f_1 60}{p}$, где p — число пар полюсов. Число оборотов поля ротора относительно ротора: $n_2 = \frac{f_2 60}{p}$, причем порядок следования фаз пусть в обеих обмотках будет один и тот же, т. е. поля статора и ротора будут вращаться в одну сторону.

Следовательно, число оборотов ротора n будет равно разности чисел оборотов n_1 и n_2 : $n = n_1 - n_2$ или

$$n = \frac{60(f_1 - f_2)}{p}. \quad (153)$$

Если число оборотов поля ротора $n_2 > n_1$, то значение числа оборотов ротора n будет с отрицательным знаком, т. е. синхронная работа двига-

теля возможна лишь при вращении ротора в сторону, противоположную вращению поля статора (направление вращения поля статора мы принимаем за положительное). Тогда поля статора и ротора окажутся неподвижны друг относительно друга. Наоборот, если $n_2 < n_1$, то ротор будет вращаться в сторону вращения поля статора (n с положительным знаком).

Предельными частными режимами обоих случаев ($n_2 > n_1$ и $n_2 < n_1$) будут являться режимы нормального синхронного двигателя ($n_2 = 0$ и, следовательно, $n_2 < n_1$) и одноякорного преобразователя ($n_1 = 0$ и, следовательно, $n_2 > n_1$). Как известно, при одном и том же порядке следования фаз на статоре синхронного двигателя и роторе одноякорного преобразователя указанные машины будут вращаться в противоположные стороны, что вытекает из приведенного выше соотношения $n = n_1 - n_2$, а именно: а) синхронный двигатель (постоянный ток на роторе) $n = n_1 - 0 = n_1$; б) одноякорный преобразователь или обращенный синхронный двигатель (постоянный ток на статоре) $n = 0 - n_2 = -n_2$.

Вращение одноякорного преобразователя в обратную сторону по сравнению с синхронным двигателем объясняется тем, что вращающееся поле его ротора должно быть в пространстве неподвижно, так как поле статора неподвижно в пространстве. Следовательно, ротор должен вращаться в сторону, противоположную вращению поля ротора относительно ротора.

Пусть мы имеем синхронный двигатель, возбуждаемый постоянным током и выполненный по типу асинхронной машины, т. е. с трехфазной обмоткой на роторе. Число его оборотов при возбуждении постоянным током равно $n = \frac{f_1 60}{p}$. Это положение является исходным для двух случаев. Если мы,

имея первоначально постоянный ток возбуждения, начнем постепенно увеличивать частоту от $f_2 = 0$, причем вращение поля возбуждения будет направлено в сторону вращения поля статора, то ротор соответственно уменьшит свое число оборотов $n = n_1 - n_2$, как уже было установлено выше. Наоборот, если мы начнем опять-таки от $f_2 = 0$ увеличивать частоту f_2 , но с порядком следования фаз обратным предыдущему, поле ротора начнет вращаться в сторону, противоположную вращению поля статора. Поэтому, чтобы сделать поле ротора неподвижным относительно поля статора, а следовательно, вращающимся в пространстве с числом оборотов n_1 , так как поле статора вращается именно с этим числом оборотов, ротор должен увеличить свое число оборотов с $n = n_1$ до $n = n_1 + n_2$. Тогда он заставит поле ротора вращаться в пространстве с числом оборотов поля статора n_1 . (Ротор вращается с числом оборотов n ; поле ротора вращается в противоположную сторону со скоростью n_2 ; следовательно, в пространстве оно окажется вращающимся с числом оборотов $n - n_2 = n_1$.)

Таким образом для случая вращения полей статора и ротора в противоположные стороны можем написать: синхронное число оборотов ротора

$$n = n_1 + n_2 = \frac{(f_1 + f_2) \cdot 60}{p}. \quad (154)$$

Или, объединяя оба выражения (153) и (154) в одно, получим

$$n = \frac{60}{p} \cdot (f_1 \pm f_2). \quad (154')$$

Знак плюс соответствует различному направлению вращения полей статора и ротора, знак минус — согласному направлению вращения указанных полей.

В первом случае $n > n_1$, причем вращение ротора происходит в сторону вращения поля статора. Во втором случае n может быть и больше и меньше n_1 , что зависит от соотношения между величинами f_1 и f_2 . Так при $f_2 \leq 2f_1$ число оборотов ротора $n \leq n_1$. При $f_2 \geq 2f_1$ имеет место $n \geq n_1$. Кроме того, если $f_2 < f_1$, вращение ротора происходит в сторону вращения поля статора; если же $f_2 > f_1$, то вращение ротора противоположно вращению поля статора. Основные соотношения между n , n_1 и n_2 приведены в табл. IX.

ТАБЛИЦА IX.

Обороты поля ротора относительно ротора	Направл. вращен. поля ста- тора $n_1 = \text{const}$	Направл. вращения поля ро- тора	Направл. вращения ротора	Число оборотов ротора n	Тип двигателя
$+ n_2$ $\left\{ \begin{array}{l} n_2 = 0 \\ n_2 < n_1 \\ n_2 = n_1 \\ n_2 > n_1 \end{array} \right.$		0		n_1	Норм. синхронн. двигатель
				$n_1 - n_2$	Двойное питание от двух сетей
			0	0	Двойное питание от одной сети (син- хронный поворот)
				$n_2 - n_1$	Двойное питание от двух сетей
$- n_2$ $\left\{ \begin{array}{l} n_2 = n_1 \\ n_2 = n_1 \end{array} \right.$				$n_2 + n_1$	То же
				$2n_1$	Двойное питание от одной сети

В случае $f_1 = f_2$, а следовательно $n_2 = n_1$ (см. таблицу), и совпадении направления полей статора и ротора последний оказывается неподвижен, так как оба поля вращаются в одну сторону с одинаковой скоростью. Такое соотношение дает синхронный режим машины двойного питания при синхронном числе оборотов $n = 0$ (аналогично обычному синхронному двигателю при частоте сети, равной нулю).

В этом случае обмотки статора и ротора могут быть присоединены к одной сети (см. рис. 141, а). Как будет видно далее, такая схема является в теоретическом отношении аналогичной схеме синхронного поворота при помощи индукционных двигателей. Практически она может быть использована для измерения пусковых моментов двигателей по методу Р. Брудерлина.¹

При питании от различных сетей двигатель двойного питания применяется в схемах синхронной связи для непосредственного привода рабочих механизмов, например рулей на судах, устройств, управляющих поворотом орудийных башен, и т. п. На рис. 143 изображена принципиальная схема, предложенная фирмой Сименс — Гальске для управления рулем на судах. Статор и ротор двигателя двойного питания D , приводящего в движение

¹ R. Bröderlin. Eine Methode zur Messung von Anlaufmomenten. E. M. 1924, № 5.

рулевой механизм, приключены к двум синхронным генераторам $C. Г.$, причем поля статора и ротора вращаются в одну сторону.

Если частоты синхронных генераторов равны, то ротор двигателя D неподвижен. Изменяя f_1 и f_2 при помощи изменения числа оборотов первичных двигателей постоянного тока M , можно получать вращение двигателя в обе стороны с различными скоростями.

Если $f_1 = f_2$ и поля вращаются в разные стороны, то синхронное число оборотов двигателя будет составлять двойное число оборотов от числа, определяемого частотой $f_1 = f_2$ и числом пар полюсов. В этом случае двигатель также может быть присоединен к одной сети (рис. 141, б). Подобного рода включение может быть использовано в схемах синхронной связи переменной частоты. С увеличением частоты от нуля подобный двигатель будет увеличивать свое число оборотов так, что оно окажется всегда соответствующим двойной частоте сети управления. К рассмотрению последнего вида включения двигателя двойного питания мы и перейдем.

135. Машина двойного питания от одной сети при вращении полей в разные стороны. Если обмотки статора и ротора двигателя двойного питания выполнены идентично, то они обе могут быть непосредственно присоединены к сети по схеме рис. 141, б.

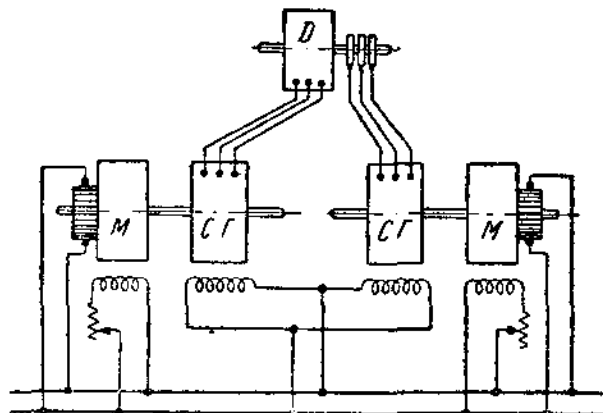


Рис. 143.

В случае приключения к сети с некоторой определенной частотой должно двигатель синхронизировать с сетью, т. е. предварительно приключив одну из обмоток (например статора), развернуть ротор машины двойного питания от постороннего вспомогательного двигателя до двойной синхронной скорости в сторону вращения поля статора (под синхронной скоростью понимается скорость, соответствующая частоте питающей сети).

При такой скорости поле предварительно приключенной к сети обмотки (например обмотки статора) будет пересекать обмотку ротора в направлении, противоположном вращению ротора, так как поле статора будет отставать от ротора на синхронное число оборотов. Благодаря этому на роторе возникнет трехфазное напряжение с чередованием фаз, обратным чередованию их на статоре. По величине указанное напряжение будет примерно равно напряжению сети. Так как от последней мы взяли напряжение также с обратным чередованием фаз, то напряжения ротора и сети окажутся направленными навстречу друг другу с согласным чередованием фаз. Поэтому при помощи синхронизирующих приспособлений (например синхронных ламп и нулевого вольтметра) обмотка ротора может быть приключена к той же сети, причем далее машина двойного питания будет работать с двойным синхронным числом оборотов (вспомогательный двигатель может быть отсоединен).

Машина сохраняет синхронность вращения независимо от нагрузки, не превосходящей некоторого опрокидывающего момента, т. е. имеет все свойства обычной синхронной машины и может работать как двигателем, так и генератором (при сдвиге поля ротора относительно поля статора на угол θ против направления вращения имеем двигатель, по направлению вращения — генератор).

Если предположить, что при холостом ходе двигателя двойного питания отсутствуют потери, то в обе обмотки будет поступать чистый намагничивающий ток, который в каждой из обмоток создаст намагничивающие ампервитки, причем ампервитки статора и ротора будут, вращаясь с одной и той же скоростью в пространстве, складываться и создавать один общий поток, индуктирующий в каждой из обмоток обратную э. д. с. примерно равную приложенному напряжению.

Кривые распределения м. д. с., создаваемых указанными намагничивающими токами, изображены на рис. 144. Величина результирующего вращающегося потока машины при том же приложенном напряжении должна быть такая же, как и при работе указанной машины обыкновенным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, так как в статоре в обоих случаях

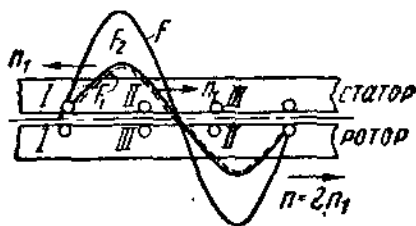


Рис. 144.

рис. 144 F_1 и F_2 обозначают вращающиеся относительно своих обмоток в разные стороны с синхронной скоростью n_1 м. д. с. статора и ротора, которые, складываясь (они неподвижны друг относительно друга потому, что ротор вращается с двойной синхронной скоростью), дают общую м. д. с. F , вращающуюся в пространстве так же, как и м. д. с. F_1 и F_2 с синхронной скоростью в сторону вращения ротора.

Так как э. д. с. статора и ротора оказываются приложенными навстречу как напряжению сети, так и друг другу, то на векторной диаграмме можно рассматривать намагничивающие токи также направленными навстречу, т. е. сдвинутыми на 180° .

Электродвижущие силы статора и ротора направлены навстречу, потому что результирующий поток пересекает обмотки статора и ротора в противоположных направлениях благодаря двойной скорости ротора.

При нагрузке машины как двигателя ротор сдвинется в сторону отставания относительно результирующего потока на некоторый угол θ , благодаря чему на этот же угол относительно потока окажутся сдвинутыми и м. д. с. статора и ротора. На рис. 145 изображены кривые распределения м. д. с. при некоторой нагрузке. М. д. с. F_1 и F_2 выросли по величине (благодаря нагрузке возникла активная составляющая тока), но в сумме попрежнему дают, примерно, ту же м. д. с. F , создающую результирующий поток Φ в машине. М. д. с. F_1 опережает последний (т. е. м. д. с. F) на угол θ , следовательно, и сила тока статора опережает магнитный поток

(наличие активной составляющей). Таким же образом и м. д. с. F_2 опережает на этот угол м. д. с. F . Следует обратить внимание на то обстоятельство, что для м. д. с. F_2 (рис. 145) углы надо отсчитывать в противоположную сторону по сравнению с отсчетами для м. д. с. F_1 , так как м. д. с. F_1 и F_2 перемещаются в различных направлениях. Сдвиг между м. д. с. F_1 и F_2 будет равен 2θ . Выпадение из синхронизма будет иметь место при раздвигании м. д. с. F_1 и F_2 на угол, близкий к 90° .

Можно также представить, что раздвигание м. д. с. F_1 и F_2 равносильно раздвиганию в пространстве обмоток, их создающих. Отсюда можно сказать, что и э. д. с. статора и ротора сдвинуты на угол 2θ .

Так как обмотки статора и ротора совершенно идентичны, то э. д. с. их равны между собой, так же как и активные и реактивные сопротивления, благодаря чему будут одинаковы в обеих обмотках и углы ψ и φ .

Общая электромагнитная мощность машины, поступающая на вал при двигательном режиме, или, наоборот, передаваемая обмоткам с вала, равна:

$$P = 2m E_1 I_1 \cos \psi,$$

где E_1 и I_1 — фазные значения э. д. с. и тока.

Следовательно, машина двойного питания развивает двойную мощность при тех же токах по сравнению с обычной синхронной или асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором. Таким образом она представляет собой как бы две синхронных машины, работающих в одном и том же режиме (обе двигателем или обе генератором) от одной сети и на один вал (двигатель) или же от одного вала параллельно на одну сеть (генератор).

Для более наглядного представления о принципе действия двигателя двойного питания допустим, что имеется обращенный синхронный двигатель, т. е. с внутренним якорем-ротором и внешними магнитами (по типу одно-якорного преобразователя). Магниты возбуждаются постоянным током, а якорь питается от сети переменного тока, благодаря чему якорь будет вращаться в сторону, обратную вращению поля по якорю (аналогично одноякорному преобразователю переменного тока в постоянный). Мощность, развиваемая двигателем на валу, равна $M\omega$, где ω — угловая скорость. Если теперь предположить, что магниты, окружающие якорь, укреплены на могущем вращаться ядре (см. рис. 101) и что они приведены при помощи какой-либо механической силы во вращение в сторону вращения якоря, то последний, делая относительно магнитов попрежнему синхронное число оборотов, будет в пространстве делая большее число оборотов, равное сумме оборотов магнитов и поля якоря. В частности, при синхронной скорости магнитов якорь окажется вращающимся в пространстве с двойной синхронной скоростью. Очевидно, что момент на валу при этом не изменился по сравнению при работе с неподвижными магнитами, но так как скорость вала возросла вдвое, то и мощность на валу также возрастет вдвое.

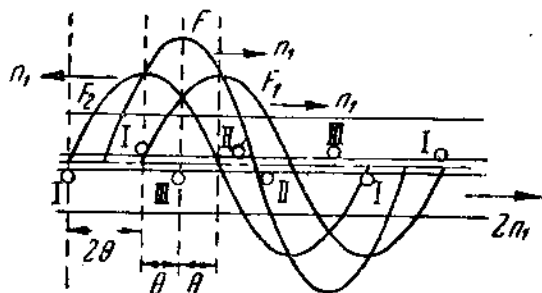


Рис. 145.

К якорию двигателя попрежнему будет подводиться та же мощность, равная половине общей мощности. Вторая половина последней будет подводиться в виде механической мощности к кольцу с магнитами для их вращения. Остается теперь лишь указать, что в двигателе двойного питания вращение магнитной системы совершается не механическим путем, а при помощи трехфазного переменного тока, поступающего в статор и передающего ему половину мощности, развиваемой двигателем. Таким образом один из синхронных двигателей, составляющих двигатель двойного питания, является нормальным синхронным двигателем (якорем служит статор), а второй представляет собой обращенный синхронный двигатель (якорем служит ротор). Половина мощности идет на увлечение полем статора ротора двигателя, а половина — на отталкивание ротора от поля статора, благодаря тому, что на роторе имеет место не поле постоянного тока, а вращающееся поле. Мощность каждой машины пропорциональна $\sin \theta$, как и в обычном син-

хронном двигателе, в силу чего обе м. д. с. (статора и ротора) оказываются сдвинутыми на угол θ относительно результирующего вращающегося потока (см. рис. 145). Момент, развиваемый двигателем, равен:

$$M = k\Phi I \sin(\hat{\Phi}).$$

Таким образом, если сравнить работу одной и той же машины как асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (уменьшением числа оборотов от скольжения пренебрегаем) и как синхронного двигателя двойного питания при одной и той же силе тока в статоре, то оказывается, что присоединением ротора к сети вращающий момент не увеличивается, а лишь удваивается скорость ротора.

Сила тока, поступающего из сети при этом, конечно, также увеличивается приблизительно в два раза, так как теперь питание поступает в равной мере как в статор, так и в ротор.

Следует отметить, что поэтому отношение реактивного тока, идущего на возбуждение, к активному току по сравнению с асинхронным двигателем вдвое меньше (реактивный ток имеет в обоих случаях одно и то же значение). Это обстоятельство дает улучшение коэффициента мощности. Вследствие полной симметрии статора и ротора векторная диаграмма для них получается одна и та же. Так как э. д. с. статора и ротора E_S и E_R равны и противоположно направлены, то общая векторная диаграмма может быть представлена в виде двух идентичных диаграмм, сдвинутых на 180° (рис. 146), причем все векторы обеих диаграмм (падения напряжения и тока) оказываются сдвинутыми также на 180° . Распределение токов на диаграмме как раз соответствует принципу разветвления токов по двум параллельным ветвям, при котором токи, а равно и э. д. с., оказываются включенными навстречу друг другу. Очевидно, что ток, поступающий из сети, например ток намагничивания I_M или полный ток I , равен арифметической сумме токов в параллельно включенных обмотках статора и ротора, а именно:

$$I_M = I_{MS} + I_{MR}$$

$$I = I_{MS} + I_R.$$

и

На диаграмме рис. 146 векторы напряжений представляют собой составляющие, уравнивающие приложенное напряжение. Для того чтобы представить векторные диаграммы обмоток статора и ротора не по отношению друг к другу, а по отношению сети, нужно нижнюю диаграмму повернуть на 180° и тогда обе диаграммы сольются в одну, являющуюся одновременно и диаграммой для статора и диаграммой для ротора, так как обе части двигателя идентичны. Следует отметить, что токи статора и ротора совпадают по фазе по отношению к сети. Вместе с тем при работе двигателя под некоторой нагрузкой м. д. с., ими создаваемые, в пространстве сдвинуты, как уже отмечалось (рис. 145) на угол 2θ .

Так же, как и для асинхронного двигателя, для машины двойного питания может быть применена электрическая эквивалентная схема, соответствующая рабочему процессу машины. В первом случае (асинхронный двигатель) цепи статора и ротора были включены последовательно. Во втором случае (машина двойного питания) эти цепи должны быть включены параллельно в соответствии со включением машины в сеть.

На рис. 147 представлена подобная схема. Очевидно, что общее полное сопротивление z машины равно половине полного сопротивления z_S статора или z_R ротора (при равенстве $z_S = z_R$).

Значения величины r_0 и x_0 определяются так же, как и для асинхронной машины, на основании величины и фазы силы общего тока холостого хода ($I_K = I_{KS} + I_{KR}$) и потерь в железе.

Надо отметить, что активная составляющая общего тока холостого хода будет примерно в два раза больше, чем в асинхронном двигателе, так как в последнем случае имеют место потери только

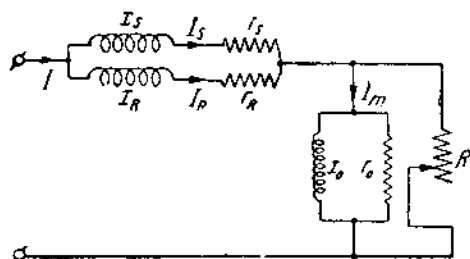


Рис. 147.

в железе статора, тогда как в первом случае, благодаря тому что железо ротора подвергается также процессу перемагничивания с полным числом периодов, одинаковые потери возникают как в статоре, так и в роторе. Следовательно, потери в железе в машине двойного питания оказываются вдвое больше, чем подобные потери в асинхронном двигателе. Энергия, поглощаемая в сопротивлении R (рис. 147), соответствует полезной работе машины.

Из рассмотрения схемы рис. 147 видно, что общий ток короткого замыкания ($I_K = I_{KS} + I_{KR}$) будет в машине двойного питания в четыре раза больше, чем в асинхронном двигателе, так как сопротивление цепи машины в первом случае в четыре раза меньше, чем во втором. Действительно, в машине двойного питания сопротивления z_S и z_R соединены параллельно, тогда как в асинхронном двигателе эти же сопротивления z_S и z_R соединены последовательно.

Круговая диаграмма для машины двойного питания может быть построена двояким образом — для всей машины или отдельно для статора и ротора, поскольку указанная машина представляет собой совмещение двух синхронных машин. Последнее построение дано на рис. 148, который получен путем перегибания нижней части векторной диаграммы на рис. 146 так, чтобы векторы U совпали. Тогда направление вращения векторов на левой

и правой половинах круговой диаграммы будет противоположным, чему соответствует обратный порядок следования фаз на роторе и статоре и пересечение результирующим потоком обмоток машины в противоположных направлениях.

Построение кругов токов производится обычным путем на основании опытов холостого хода и короткого замыкания или соответствующих подсчетов. Величина тока короткого замыкания в каждой из обмоток (статора и ротора) будет в два раза более, чем в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором. Таким образом общий ток короткого замыкания будет в четыре раза более, чем в асинхронном двигателе.

Вследствие этого предельная мощность машины двойного питания будет также в четыре раза больше, а предельный момент соответственно в два раза.

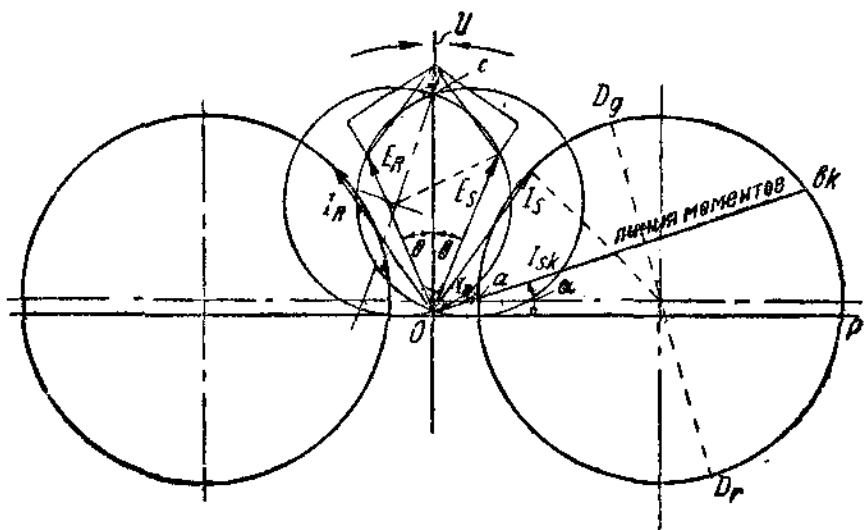


Рис. 148.

Перегинув чертеж (рис. 148) по оси ординат, получим диаграмму для всей машины, причем масштаб всех величин должен быть уменьшен вдвое, чтобы соответствовать данным всей машины. Прямая abk представляет собой линию механической мощности, и так как скорость двигателя неизменна, — то и линию моментов. Точки D_0 и D_2 на круге представляют собой границы устойчивой работы машины соответственно двигателем и генератором.

Дуга aD_0 представляет собой область устойчивой работы двигателем, а дуга aD_2 — область устойчивой работы генератором.

Линии потерь строятся обычным образом. Так, линия потерь в меди представляет собой полуокружность круга тока относительно полюса O , линия потерь холостого хода является касательной к кругу в точке b_k .

Диаграмма э. д. с. получается также обычным образом, путем нанесения окружностей э. д. с.¹ Каждая из этих окружностей должна прохо-

¹ См., например, В. Ф. Миткевич. — Теория переменных токов, 1931 г., стр. 134–135, изд. Кубуч.

дуть через точку C на оси ординат, соответствующую наибольшему значению обратной э. д. с., имеющему место при холостом ходе, и через начало координат, чему соответствует случай короткого замыкания. Центры указанных окружностей лежат на прямых, составляющих с осью ординат угол $\alpha = < b_k \text{ Op}$.

136. Машина двойного питания от двух сетей при вращении полей в разные стороны. Эквивалентная схема (рис. 147) и круговая диаграмма (рис. 148) действительны также и для общего случая, когда машина работает, будучи присоединена к двум сетям различной частоты. Однако в этом случае надлежит все величины одной из обмоток (например ротора) привести к другой в отношении числа витков и числа периодов. Тогда полное сопротивление машины Z будет представлять результи-

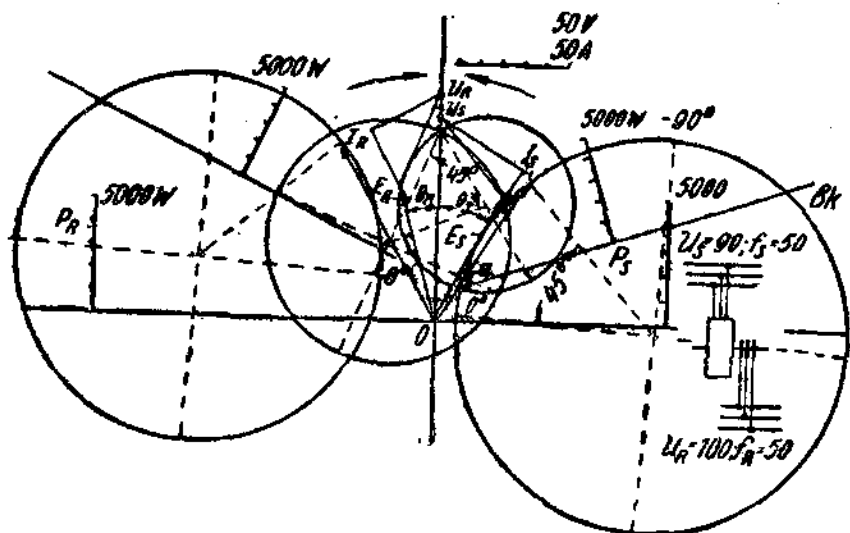


Рис. 149.

рующее сопротивление цепи параллельно соединенных сопротивлений обмоток, приведенных к какой-нибудь из обмоток, считаемой первичной.

Очевидно, что распределение мощностей на обмотки машины будет находиться в соответствии с частотой, напряжением и параметрами каждой из обмоток.

На рис. 149 представлены векторная и круговая диаграммы машины двойного питания от сетей с одинаковыми частотами, но различными напряжениями, причем параметры машин также различны. Напряжение на роторе U_S больше напряжения U_S на статоре. Для построения указанной диаграммы взят частный случай машины со следующими параметрами: $r_S = 0,2 \text{ } \Omega$; $x_S = 0,6 \text{ } \Omega$; $r_R = 0,3 \text{ } \Omega$; $x_R = 0,4 \text{ } \Omega$. Напряжение на статоре $U_S = 90 \text{ V}$, напряжение на роторе $U_R = 100 \text{ V}$. Так как $f_S = f_R$, то при равенстве витков обмоток статора и ротора и приложенных напряжений э. д. с. E_S и E_R равны между собой (при равенстве витков и соответствующих им напряжений равны их значения, приведенные к одной обмотке).

¹ В. Т. Касьянов. — Журн. «Электричество», 1931 г., № 21, вып. I, стр. 1196.

В данном случае диаграммы напряжений взяты с приведением к какой-либо из обмоток, но с различными напряжениями.

Радиусы кругов E_S и E_R оказываются неравными, причем, как показывают исследования,¹ при $f_S = f_R$ радиус круга E_S равен вектору центра круга E_R (расстоянию от начала координат до центра круга), а вектор центра круга E_S равен радиусу круга E_R .

Благодаря тому, что параметры статора и ротора различны, различными оказываются и углы θ_S и θ_R .

Следует отметить, что мощности, поступающие из сети на статор и ротор, неодинаковы, как это явствует из диаграммы на рис. 149, а именно: мощность, поступающая на ротор, больше (приложенное напряжение больше), чем мощность, идущая из сети на статор. На диаграмме линии avk являются линиями моментов и механической мощности. Вследствие неравенства напряжений U_S и U_R масштабы мощности для левой и правой половин диаграмм различны (указаны на диаграмме).

Весьма интересным является рассмотрение работы двигателя двойного питания при изменении частоты на зажимах одной из обмоток, например ротора. Если постепенно уменьшать частоту, то синхронное число оборотов двигателя двойного питания начинает приближаться к синхронному числу оборотов нормального синхронного двигателя (число оборотов определяется при вращении полей в разные стороны формулой $n = \frac{(f_1 + f_2) 60}{P}$).

Свойства двигателя двойного питания также будут подходить к свойствам синхронного двигателя с возбуждением постоянным током в отношении передачи мощности валу. Так, электромагнитная мощность, передаваемая валу обмоткой, частота тока в которой уменьшается, будет соответственно уменьшаться, пока при частоте равной нулю (постоянный ток) не станет также равной нулю. Это следует из того соображения, что моменты статора и ротора должны быть равны (это собственно один и тот же момент вращения, действующий между статором и ротором), а электромагнитные мощности статора и ротора, передаваемые на вал, относятся как скорости полей относительно своей обмотки, т. е. как частоты f_S и f_R . Очевидно, что при питании одной из обмоток постоянным током (нормальный синхронный двигатель) электромагнитная мощность, передаваемая на вал ротора этой обмоткой, равна нулю, так как поле постоянного тока неподвижно относительно обмотки, его создающей.

Диаграмма для случая $f_R < f_S$ представлена на рис. 150 для машины с теми же данными, что и на диаграмме рис. 149.

Для большей наглядности на диаграмме приведения к первичной частоте можно не делать, т. е. все величины, например ротора, приведенные к числу фаз и к числу витков обмотки статора, рассматриваются при частоте, действительно существующей в его цепи. Напряжение на статоре $U_S = 90$ В, частота $f_S = 50$ Hz. На ротора соответственно $U_R = 40$ В и $f_R = 10$ Hz. Следовательно, двигатель должен делать при двух полюсах $n = 3600$ об., что можно охарактеризовать как отрицательное скольжение, равное $s = -0,2$ по отношению к синхронному числу оборотов синхронного двигателя с возбуждением постоянным током.

Если число витков обмоток статора и ротора одинаково, то для распределения намагничивающего тока поровну (подобно тому, как это имеет

¹ В. Т. Касьянов. — Журн. „Электричество“, 1931 г., № 21, вып. I, стр. 1196.

место на диаграмме по рис. 148) подведенные напряжения к статору и ротору должны находиться в соотношении:

$$\frac{U_S}{U_R} = \frac{f_S}{f_R},$$

или, так как

$$\frac{R}{f_S} = s,$$

можно написать:

$$U_S = \frac{U_R}{s}.$$

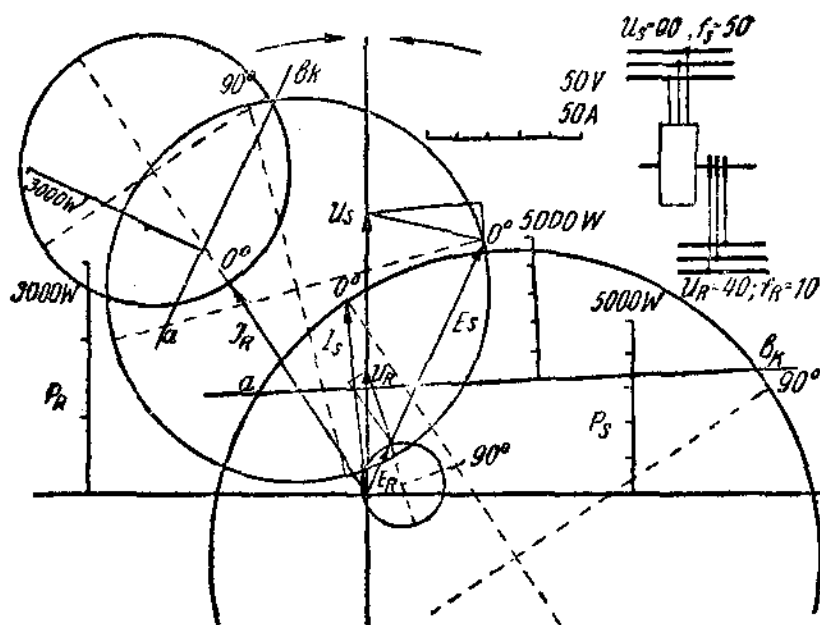


Рис. 150.

Для данного частного случая при одинаковом числе витков напишем:

$$\frac{U_R}{s} = \frac{40}{0,2} = 200 > 90 \text{ V},$$

т. е. со стороны ротора имеет место перевозбуждение, которое в нормальной области работы для ротора дает отстающий ток (см. рис. 150), а для статора — упреждающий (статор имеет перекомпенсацию так же, как это было бы и при возбуждении постоянным током при увеличении напряжения на зажимах обмотки возбуждения).

Если увеличить напряжение U_S и уменьшить U_R , то центр круга тока I_S сдвинется вправо от начала координат и уменьшится в диаметре. Вместе с тем диаметр круга тока I_R увеличится и центр его также сдвинется вправо, приблизившись к началу координат.

Из диаграммы на рис. 150 видно, что электромагнитная мощность ротора ($P_{\psi R} = m E_R I_R \cos \psi_R$) значительно меньше электромагнитной мощности статора.

В пределе при $s=0$, т. е. $f_R=0$ круг тока I_R превращается в точку, причем вектор тока I_R оказывается равным вектору центра, который совмещается с осью ординат (совпадение по фазе с напряжением). По величине он будет равен:

$$I_R = \frac{U_R}{r_S},$$

т. е. вторичному „фазному“ напряжению (постоянного тока), разделенному на омическое сопротивление фазы ротора.

На диаграмме линии abk поперечному представляют собой линии моментов и механической мощности (о построении их — см. далее).

Масштабы для мощностей указаны на диаграмме. Очевидно, что если в отношении частоты обмотки статора и ротора поменять местами, то будет иметь место та же диаграмма, но представляющая зеркальное изображение диаграммы на рис. 150.

Если двигатель двойного питания работает от одной сети с меняющейся частотой (случай схемы синхронной связи; рис. 141, б), то так же, как и при обычных синхронных двигателях для получения наилучших условий работы надлежит соблюдать известное соотношение:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}.$$

Очевидно, что в этом случае при всех частотах и одинаковых параметрах на статоре и роторе круговая диаграмма будет подобна диаграмме на рис. 148.

137. Выражение для общего случая машины двойного питания. Различные режимы работы машины двойного питания, под которой понимается машина двойного питания в широком смысле (работа от отдельных сетей разных частот и напряжений, питающих обмотки с неодинаковыми параметрами), могут быть охвачены, как показал В. Т. Касьянов,¹ общими выражениями для э. д. с. и токов. Подстановка в эти общие выражения частных значений некоторых переменных позволяет получить формулы для построения векторных и круговых диаграмм отдельных режимов машины двойного питания.

Приведем эти выражения:

$$\dot{I}_S = \frac{\dot{U}_S(s + z_{RS}\dot{Y}_S) - U_R e^{-j(\theta_S - \theta_R)}}{z_{RS} + s z_S + z_S \dot{z}_{RS} \dot{Y}_S}; \quad (155)$$

$$-\dot{E}_S = \frac{U_S \dot{z}_{RS} + U_R \dot{z}_S e^{-j(\theta_S - \theta_R)}}{z_{RS} + s z_S + z_S \dot{z}_{RS} \dot{Y}_S}; \quad (156)$$

$$\dot{I}_R = \frac{U_R(1 + z_S \dot{Y}_S) - U_S s e^{+j(\theta_S - \theta_R)}}{z_{RS} + s z_S + z_S \dot{z}_{RS} \dot{Y}_S}; \quad (157)$$

$$-\dot{E}_R = \frac{U_R s \dot{z}_S + U_S \dot{z}_{RS} e^{+j(\theta_S - \theta_R)}}{z_{RS} + s z_S + z_S \dot{z}_{RS} \dot{Y}_S}. \quad (158)$$

¹ В. Т. Касьянов. — Журн. „Электричество“, 1931 г., № 21, вып. I, стр. 1189—1190.

Здесь U_S и U_R — фазные напряжения на статоре и роторе; $s = \frac{f_R}{f_S}$ — скольжение; I_S и I_R — векторы токов статора и ротора; $\dot{E}_S$ и $\dot{E}_R$ — векторы э. д. с. их; θ_S и θ_R — углы между векторами напряжений и э. д. с. $\dot{z}_S = r_S + jx_S$ — комплекс сопротивления фазы статора (при $f_S = 50$ Hz); $\dot{z}_R = r_R + jx_R$ — комплекс сопротивления фазы ротора при частоте, при частоте $f_R = 50$ Hz; $\dot{z}_{Rs}$ — комплекс сопротивления фазы ротора при частоте $f_R = 50 \cdot s$ Hz; $Y = g_S + g_R - jb$ — комплекс проводимости намагничивания машины (g_S и g_R — активные проводимости намагничивания железа статора и ротора при частоте 50 Hz); b — реактивная проводимость намагничивания воздушного промежутка и железа машины); $Y_S = g_S + g_R \cdot s - jb$ — комплекс проводимости намагничивания машины при частоте $f_R = s \cdot 50$ Hz; $e^{\pm j(\theta_S - \theta_R)}$ — оператор поворота вектора на угол $\pm(\theta_S - \theta_R)$, причем $e^{\pm j(\theta_S - \theta_R)} = \cos(\theta_S - \theta_R) \pm j \sin(\theta_S - \theta_R)$; угол $(\theta_S - \theta_R)$ — угол между векторами э. д. с. $\dot{E}_S$ и $\dot{E}_R$ (в общем случае $\theta_S - \theta_R$ может означать не только угол между $\dot{E}_S$ и $\dot{E}_R$ при совпадении U_S и U_R , но также и угол между U_S и U_R при совпадении $\dot{E}_S$ и $\dot{E}_R$). Следует отметить, что у тока и э. д. с. статора оператор поворота отрицательный (вращение по часовой стрелке), а у тока и э. д. с. ротора оператор поворота положительный (вращение против часовой стрелки).

При различных направлениях вращения полей ротора и статора направление вращения векторов на диаграммах ротора и статора получается противоположным (рис. 148, 149, 150). Поэтому в данном случае в общих формулах величине s должно придать знак минус (число оборотов ротора больше, чем число оборотов поля статора и имеет то же направление что и поле статора), а вместо угла θ_R подставить $\theta_R + 180^\circ$, благодаря чему оператор поворота будет иметь вид:

$$e^{\pm(\theta_S + \theta_R)}.$$

Вычисление величин I_S , I_R , $\dot{E}_S$ и $\dot{E}_R$ облегчается тем, что все выражения (155); (156); (157); (158) имеют один общий знаменатель. За независимую переменную в указанных формулах могут быть приняты или угол $\theta_S - \theta_R$ или скольжение s .

В соответствии с этим все машины, охватываемые данными формулами, могут быть разбиты на две группы:

- а) синхронные машины двойного питания ($\frac{f_R}{f_S} = s = \text{const}$ и $\theta_S - \theta_R = \text{var.}$).
- б) асинхронные машины двойного питания ($\theta_S - \theta_R = \text{const}$ и $s = \text{var.}$).

Из указанных общих выражений следует, что геометрическим местом концов векторов токов и э. д. с. является окружность. Действительно, написав выражение (155) в виде суммы двух членов:

$$I_S = \frac{U_S (s + \dot{z}_{Rs} Y_S)}{z} - \frac{U_R \cdot e^{-j(\theta_S - \theta_R)}}{z},$$

можем, в частности для группы синхронных машин, отметить, что первый член выражения имеет при $s = \text{const}$ постоянную величину и положение, второй же член постоянен по абсолютной величине, но изменяет свое расположение в диаграмме при изменении угла $\theta_S - \theta_R$. Таким образом первый член является вектором центра окружности (он пропорционален U_S),

а второй есть радиус окружности (пропорционален U_R), по которой движется конец вектора I_S при изменении угла $\theta_S - \theta_R$.

Таким же образом можно установить, что геометрические места концов векторов $I_R \cdot -E_S \cdot -E_R$ — также окружности. В частном случае, если значение $s = \text{const} = 0$, получим формулы для синхронной машины с возбуждением постоянным током.

При постоянстве U_S, U_R и s и при изменении угла $\theta_S - \theta_R$ будет иметь место работа синхронной машины двойного питания при постоянном возбуждении. Наоборот, если положить $s = \text{const}$; $(\theta_S - \theta_R) = \text{const}$, а U_S или $U_R = \text{var.}$, то получается работа синхронной машины двойного питания при переменном возбуждении (U-образные кривые). В этом случае выражения возбуждения (155); (156); (157); (158) превращаются в уравнения прямой линии.

Таким образом, пользуясь указанными выражениями, можно построить векторные и круговые диаграммы для различных соотношений U_S и U_R параметров и величин скольжений s .

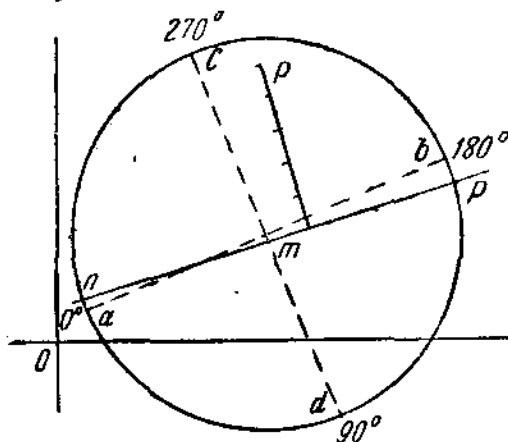


Рис. 151.

(рис. 151) и находят для этих точек соответствующие им величины тока I_S и э. д. с. E_S , для чего предварительно должны быть построены соответствующие круги I_S и E_S .

После этого для всех этих точек вычисляют медные потери $I_S^2 r_S$ и железные потери $E_S^2 g_S$ и находят их сумму. Для этих же точек определяют из диаграммы значения подведенной мощности P_S и, затем, вычисляют значения электромагнитной мощности $P_{\psi S} = P_S - (I_S^2 r_S + E_S^2 g_S)$.

Как известно, вращающий момент измеряется отрезком прямой, заключенной между линией моментов и данной точкой окружности. Поэтому для нахождения масштаба $k_{\psi S}$ электромагнитной мощности статора надлежит разделить диаметр cd на разность значений электромагнитной мощности для точек c и d , равную $P_{\psi c} - (\pm P_{\psi d})$.

Таким образом масштаб $k_{\psi S}$ будет равен:

$$k_{\psi S} = \frac{cd}{P_{\psi c} - (\pm P_{\psi d})}. \quad (159)$$

¹ E. Arnold.—WST, Bd. V, стр. 85.

² Журн. „Электричество“, 1931 г., № 22, вып. II, стр. 1287.

Отложив от точки c отрезок cm , равный $\frac{P_{\psi c}}{k_{\psi s}}$, получим одну точку m линии моментов. Для нахождения второй точки нужно отложить от одной из двух других диаметральных точек a или b параллельно линии ca отрезки, представляющие в масштабе $k_{\psi s}$ значения электромагнитных мощностей для этих точек, а именно отрезок $an = \frac{P_{\psi a}}{k_{\psi s}}$ или отрезок $bp = \frac{P_{\psi b}}{k_{\psi s}}$.

Тогда прямая mp и будет линией моментов.

Как видно из рис. 151, в общем случае линия моментов не является перпендикулярной диаметру cd , в направлении которого берутся отрезки, измеряющие величины моментов. Поэтому, если желательно измерять моменты отрезками перпендикулярными линии моментов, а не параллельными диаметру cd , как это было получено из построения, то масштаб $k_{\psi s}$ нужно умножить на синус угла между линией моментов и диаметром cd .

Зная масштаб электромагнитной мощности, без труда определим и масштаб вращающего момента (если считать мощность P_{ψ} как момент в синхронных ваттах, то масштаб будет один и тот же). Масштаб электромагнитной мощности для ротора, благодаря другой, чем на статоре, угловой скорости поля ротора относительно ротора (момент один и тот же), равен:

$$k_{\psi n} = k_{\psi s} s.$$

Очевидно, что для синхронной машины масштаб электромагнитной мощности является масштабом механической мощности.

138. Машина двойного питания от одной сети при вращении полей в одну сторону. Выше отмечалось, что двигатель двойного питания при вращении полей в разные стороны состоит как бы из двух работающих с одним и тем же моментом на общий вал двигателей (обычного и обращенного, т. е. с питанием с ротора), причем результатом их совместной работы является увеличенная против синхронной скорости каждого из них результирующая синхронная скорость при неизменном моменте на валу. Это обстоятельство отличает работу подобных двигателей от совместной работы обычных двигателей на один вал, где суммируется момент, а не скорость. При уменьшении частоты тока, питающего одну из обмоток двигателя, скорость ротора уменьшается. В результате при том же рабочем моменте на его валу мощность, развиваемая двигателем, соответствующим этой обмотке, уменьшается пропорционально уменьшению частоты. При частоте равной нулю (постоянный ток) мощность этого двигателя становится также равной нулю, так как поле его оказывается неподвижным относительно своей обмотки. В результате этого двигатель двойного питания превращается в обычный синхронный двигатель, который можно рассматривать как частный случай двигателя двойного питания.

Далее, будем опять увеличивать частоту от нуля в указанной обмотке, но только с направлением вращения поля в ту же сторону, что и поле неизменного числа оборотов другой обмотки. При наличии в машине двух полей, вращающихся в одну сторону, ротор будет вращаться за счет разности скоростей этих полей, т. е. теперь уже с меньшим синхронным числом оборотов, чем синхронное число оборотов при возбуждении постоян-

ным током. Для уяснения принципа работы двигателя в этом режиме можно воспользоваться той же моделью, которая была разобрана для двигателя двойного питания с вращением полей в разные стороны (см. § 135).

При неподвижной внешней магнитной системе и питании ротора переменным током ротор будет вращаться в сторону, противоположную вращению поля по ротору, например против часовой стрелки при вращении поля по часовой стрелке. Теперь, если привести во вращение внешнюю магнитную систему в сторону вращения поля (т. е. по часовой стрелке), то ротор окажется участвующим в двух противоположно направленных движениях: во-первых, он будет вращаться, отталкиваясь от статора, в направлении против часовой стрелки и, во-вторых, внешняя магнитная система будет увлекать его в направлении по часовой стрелке. В результате ротор в пространстве будет делать число оборотов, равное разности оборотов магнитной системы и ротора относительно этой последней:

$$n = n_S - n_R.$$

Таким образом мощность, сообщаемая ротору внешней магнитной системой, которая представляет вращающееся поле статора, равна $M\omega_S$, а мощность, развиваемая самим ротором, — $M\omega_R$.

Действительная мощность на валу двигателя равна:

$$P_m = M(\omega_S - \omega_R) = M\omega_S - M\omega_R.$$

Следовательно, мощность $M\omega_S$ и $M\omega_R$ имеют различные знаки, т. е. одна из них — мощность двигателя (большая), а другая — генератора (меньшая). Это подтверждается и рассмотрением углов θ сдвига ротора относительно поля в машине. Пусть $\omega_S > \omega_R$ и ротор двигателя вращается по часовой стрелке. Если вал двигателя нагрузить тормозящим моментом, то ротор повернется на некоторый угол θ в сторону, противоположную вращению поля статора и самого ротора. Одновременно этот сдвиг происходит по направлению вращения ротора относительно полюсов статора, что характерно для генераторного режима машины.

Следует заметить, что в обращенном синхронном двигателе (например одноякорном преобразователе) сдвиг ротора при нагрузке происходит в сторону, противоположную вращению ротора и по вращению поля (это дает тот же эффект, что и в обычном синхронном двигателе, а именно — отставание магнитной системы на угол θ в пространстве от вращающегося поля якоря).

В случае генераторного режима в обращенной синхронной машине, наоборот, происходит сдвигание ротора по его вращению и против вращения поля, что дает эффект опережения в пространстве магнитной системой вращающегося поля якоря.

Таким образом в двигателе двойного питания при его нагрузке тормозящим моментом происходит в отношении обращенной синхронной машины (питание с ротора) при $\omega_S > \omega_R$ сдвиг по вращению ротора относительно поля статора и против вращения поля ротора относительно ротора, что дает генераторный режим для обращенной синхронной машины.

Наконец, когда при увеличении или уменьшении частоты в одной из обмоток частоты в обмотках статора и ротора сравниваются и поля последних будут вращаться в одну сторону с одинаковой скоростью, число оборотов

гала окажется равным нулю, т. е. генераторный и двигательный режимы будут количественно одинаковыми:

$$P_m = M\omega_S - M\omega_R = 0,$$

так как

$$\omega_S = \omega_R.$$

Если обратиться к разбиравшейся выше модели, то для этого последнего случая будут иметь место следующие соотношения. Обращенный синхронный двигатель (обмотка ротора) будет вращать ротор относительно магнитной системы статора в сторону противоположную вращению поля ротора. В это же самое время магнитная система (поле статора), вращаясь по направлению вращения поля ротора, будет увлекать последний за собой с той же скоростью, что и скорость поля ротора, в результате чего ротор будет неподвижен в пространстве, а оба режима (генератора и двигателя) окажутся компенсирующими друг друга.

В этом случае обе обмотки двигателя могут быть присоединены к одной сети с одинаковым порядком следования фаз (рис. 141,а), причем синхронное число оборотов вала двигателя будет равно нулю, что следует и из формулы для числа оборотов двигателя двойного питания при вращении полей в одну сторону:

$$n = \frac{(f_S - f_R) 60}{p} = 0,$$

так как

$$f_S - f_R = 0.$$

Таким образом при питании от одной сети двигателя двойного питания в случае вращения полей в разные стороны обе обмотки машины двойного питания (обе машины, его составляющие) работают в режиме двигателя, а то время как при вращении полей в одну сторону одна обмотка (одна машина) находится в режиме двигателя (потребляет энергию из сети), а другая (вторая машина) — в режиме генератора (отдает энергию в сеть). Результирующее потребление энергии из сети равно разности абсолютных значений энергии, потребляемой двигателем и отдаваемой в сеть.

Если на валу двигателя нет никакого тормозящего момента и трение в подшипниках отсутствует, то в случае включения по схеме на рис. 141, а, ротор повернется таким образом, что оси обмоток совпадут, причем совпадут и м. д. с. статора и ротора, создаваемые намагничивающими токами, поступающими в статор и ротор двигателя. Расположение м. д. с. будет подобно представленному на рис. 144, с той лишь разницей, что порядок следования фаз на статоре и роторе будет одинаков, а не различен, как это изображено на рис. 144 для случая вращения полей в разные стороны. Таким же образом намагничивающий ток при идентичности обмоток будет делиться поровну между ними и создавать общий поток, индуктирующий равные и обратные э. д. с. E_S и E_R , уравновешивающие приложенное напряжение.

Если к сети приключить лишь одну из обмоток, то в нее будет поступать намагничивающий ток вдвое больший, чем ток, поступающий в каждую из обмоток, когда они включены обе. Для включения двигателя в сеть

(рис. 152) надлежит пользоваться синхронизирующими приспособлениями (синхронными лампами, нулевым вольтметром и т. д.), точно так же, как это делается для приключения к сети любой синхронной машины. Одна из обмоток включается в сеть непосредственно, например обмотка статора S , вторая же, R , через лампы и нулевой вольтметр. Поворачиванием ротора добиваются совпадения по фазе напряжения сети и обратной э. д. с. E_S или E_R , что наступает при совпадении осей обеих обмоток.

При включении одной обмотки в сеть машина по существу представляет собой регулятор фазы, так как при повороте ротора магнитный поток пересекает соответствующие фазы вторичной обмотки со сдвигом во времени, определяющим сдвиг по фазе первичного и вторичного напряжений. Такой же сдвиг по фазе э. д. с. статора и ротора имеет место и в трехфазном индукционном регуляторе, представляющем собой заторможенный асинхронный двигатель.

Схема включения двигателя двойного питания на одну сеть при включении полей в одну сторону называется

питания на одну сеть при включением Брюдерлина по имени автора, предложившего подобную схему для определения начальных (пусковых) моментов двигателей.¹

Если вывести ротор из положения совпадения осей обмоток статора и ротора, то м. д. с. обмоток раздвинется в пространстве одна относительно другой, подобно тому, как это изображено на рис. 145, в силу чего указанные м. д. с. должны возрасти по величине, чтобы создать тот же резуль-

тирующий магнитный поток. Сдвигание по фазе потока и м. д. с. вызовет вращающий момент, равный в общем виде

$$M = k \Phi I \sin (\Phi /).$$

Этот момент будет стремиться, так же, как и во всякой синхронной машине, привести ротор к совпадению осей обмоток. Наличие вращающегося магнитного потока и вращающего момента свидетельствует о передаче энергии со статора на ротор или наоборот.

Пусть ротор повернут на некоторый угол θ из положения совпадения осей против направления вращения поля. Тогда на статоре такой поворот против поля вызовет режим двигателя, т. е. из сети поступит мощность

$$P_S = m U I_s \cos \varphi_s$$

(сдвигание м. д. с. ротора и статора в пространстве вызывает появление активного тока в обеих обмотках).

За вычетом потерь в статоре Q_S оставшая часть (электромагнитная мощность) будет передана вращающимся полем со статора на ротор, который работает в режиме генератора, так как сдвиг ротора произошел

¹ R. Brüderlin. — Eine Methode zur Messung von Anlaufmomenten. Е. u. М., 1924, Н. 5.

против поля, что для обращенной синхронной машины обуславливает генераторный режим.

Электромагнитная мощность P_ψ , передаваемая со статора на ротор, равна

$$P_\psi = m E_S I_S \cos \psi_S.$$

Эта же мощность на роторе должна быть представлена так:

$$P_\psi = m E_R I_R \cos \psi_R.$$

Часть мощности P_ψ за вычетом потерь в роторе Q_R возвращается обратно в сеть

$$P_R = P_\psi - Q_R.$$

Если поворот ротора произведен по вращению поля, то обмотка ротора оказывается в режиме двигателя, а обмотка статора — в режиме генератора. Существенно сопоставить еще раз это включение с включением при вращении полей в разные стороны. В последнем случае обе обмотки находятся в режиме двигателя и поэтому двигатель развивает на своем валу двойную мощность.

Факт циркуляции энергии через двигатель двойного питания, включенного по схеме Брюдерлина, легко установить при помощи ваттметров, включенных в цепи статора и ротора. Энергия, расходуемая при такой передаче энергии через машину, равняется сумме потерь в статоре и роторе $Q_S + Q_R$, так как мощность, развиваемая двигателем на валу, при данном моменте M равна нулю (угловая скорость вала равна нулю).

Величина вращающего момента двигателя равна

$$M = \frac{P_\psi}{9,81 \frac{2\pi f}{p}} \text{ кгм},$$

где $\frac{2\pi f}{p}$ — угловая пространственная скорость вращающегося магнитного потока. Величина момента, так же как и в обычной синхронной машине, растет с увеличением угла θ сдвига между обмотками статора и ротора под действием внешнего момента, уравновешиваемого первым моментом.

Для схемы Брюдерлина круговая диаграмма может быть получена путем применения общих выражений (155); (156); (157); (158) для двигателя двойного питания, в которые надлежит подставлять параметры обмоток и значения напряжения $U = U_S = U_R$. Так как ротор стоит, то скольжение по отношению к синхронным оборотам обычного синхронного двигателя составляет: $s = +1$.

Если параметры обмоток статора и ротора идентичны, причем обе обмотки приключены на общее напряжение, то круги токов I_S и I_R сливаются в один, равно как и круги обратных э. д. с. E_S и E_R . При указанных условиях ($s = 1$; $z_S = z_R = z$; $g_S = g_R = g$; $U_S = U_R = U$) общие выражения для двигателя двойного питания примут вид:

$$I_S = U \cdot \frac{1 + (r + jx)(2g - jb) - e^{-j(\theta_S - \theta_R)}}{2(r + jx) + (r + jx)^2(2g - jb)}; \quad (160)$$

$$I_R = U \cdot \frac{1 + (r + jx)(2g - jb) - e^{+j(\theta_S + \theta_R)}}{2(r + jx) + (r + jx)^2(2g - jb)}; \quad (161)$$

$$-\dot{E}_S = U \frac{(r+jx) + (r+jx) e^{-j(\theta_S - \theta_R)}}{2(r+jx) + (r+jx)^2(2g-jb)}; \quad (162)$$

$$-\dot{E}_R = U \cdot \frac{(r+jx) + (r+jx) e^{+j(\theta_S - \theta_R)}}{2(r+jx) + (r+jx)^2(2g-jb)}. \quad (163)$$

Зная параметры двигателя, можно расчетным путем получить круговую диаграмму.

Пусть, например, двигатель имеет следующие параметры:

$$\dot{z}_s = \dot{z}_R = \dot{z} = r + jx = 0,2 + j0,6;$$

$$\dot{Y} = g_S + g_R - jb = 0,1 + 0,1 - j0,4$$

(параметры для получения диаграммы в надлежащем масштабе взяты плохие).

$$U = 100 \text{ В}; s = +1.$$

Подставим указанные значения в выражение (160) для I_s и произведем в числителе и знаменателе элементарные преобразования: ¹

$$\dot{I}_S = \frac{(128 + j4) - 100 e^{-2j\theta}}{0,432 + j1,376}.$$

(При одинаковых параметрах углы θ_S и θ_R одинаковы, а так как они взаимно противоположны, то $\theta_S - \theta_R = 2\theta$).

Для деления одной комплексной величины на другую выражение для $\dot{I}_S$ может быть представлено в такой форме:

$$\dot{I}_S = \frac{\sqrt{128^2 + 4^2} e^{j(\arctg \frac{4}{128})} - 100 e^{-2j\theta}}{\sqrt{0,432^2 + 1,376^2} e^{j(\arctg \frac{1,376}{0,432})}},$$

или

$$\dot{I}_S = \frac{129 \cdot e^{j1^\circ 50'} - 100 e^{-2j\theta}}{1,41 e^{j72^\circ 40'}};$$

далее

$$\dot{I}_S = 91,2 (\cos 70^\circ 50' - j \sin 70^\circ 50') - e^{-2j\theta} \cdot 71 (\cos 72^\circ 40' - \sin 72^\circ 40');$$

получим окончательно:

$$\dot{I}_S = (30 - j86) + e^{-2j\theta} (-21,3 + j63).$$

Пользуясь этим выражением, построим круг тока I_S (рис. 153).

Первый комплексный член выражения $\dot{I}_S$ имеет постоянное значение по величине и направлению и представляет собой вектор центра окружности

¹ О действиях над комплексными выражениями см., например, В. Ф. Миткевич. — Теория переменных токов, 1931 г., стр. 112—119.

тока. Второй комплексный член, снабженный оператором поворота $e^{-2j\theta}$, есть радиус окружности, поворачивающийся вокруг конца вектора центра и описывающий полную окружность при изменении угла 2θ от нуля до 360° .

Для нахождения центра круга I_S откладываем в некотором масштабе тока по оси вещественных количеств первое слагаемое члена $(30 - j \cdot 86)$. Затем по оси мнимых количеств в отрицательном направлении откладываем второе слагаемое $-j86$. Указанные слагаемые и будут координатами центра окружности.

Далее, полагаем $\theta = 0^\circ$, благодаря чему оператор поворота $e^{-2j\theta}$ обращается в единицу.

Это позволяет найти точку окружности, соответствующую углу $\theta = 0$. Для этого нужно от центра окружности отложить вектор $(-21,3 + j \cdot 63)$ или же от начала координат вектор $(30 - j \cdot 86) + (-21,3 + j \cdot 63) = 8,7 - j \cdot 23$, являющийся вектором тока холостого хода.

Если сравнить выражения для I_S и I_R , то придем к заключению, что они тождественны, за исключением знака у показателя степени оператора поворота.

Следовательно, векторы токов I_S и I_R движутся по одной окружности.

Так как обмотки совершенно одинаковы, линия моментов должна пройти через центр круга и являться его диаметром (на рис. 153 линия abk), что обуславливается совпадением кругов токов I_S и I_R .

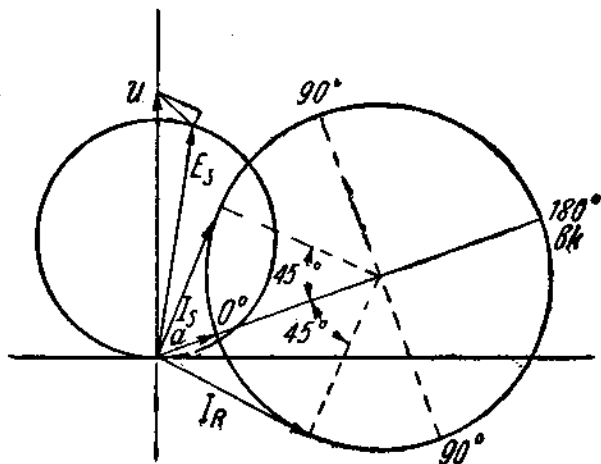


Рис. 153.

Найдем теперь круги э. д. с. — E_S и — E_R . Выражения для них опять-таки в этом частном случае тождественны кроме знака у степени оператора поворота. Поэтому круги э. д. с. — E_S и — E_R совпадают (достаточно решения одного уравнения, например для — E_S).

Подставляя соответствующие данные в выражение (162), получим:

$$-E_S = \frac{(20 + j \cdot 60) + (20 + j \cdot 60) e^{-2j\theta}}{0,432 + j1,376}.$$

(знаменатель для всех выражений один и тот же, что облегчает подсчеты) или окончательно будем иметь:

$$-E_S = (44,7 - j \cdot 0,9) + e^{-2j\theta} (44,7 - j \cdot 0,9).$$

Таким образом в этом случае вектор центра окружности равен радиусу окружности, следовательно, последняя проходит через начало координат.

Пользуясь полученным выражением, строим круг э. д. с. Далее, полагая $\theta = 0^\circ$, находим положение векторов $-E_S$ и $-E_R$ при совпадении осей обмоток статора и ротора.

Диаметрально расположенными точками на кругах E и I по отношению точек $\theta = 0^\circ$ являются точки $\theta_S - \theta_R = 180^\circ$, а под прямым углом к этим точкам находятся точки $\theta_S - \theta_R = 90^\circ$ и 270° .

На рис. 153 построена также векторная диаграмма для случая $\theta_S - \theta_R = 45^\circ$ (обмотки статора и ротора сдвинуты своими осями в пространстве на угол в 45 электрических градусов, равный $\theta_S - (-\theta_R)$, так же, как и их м. д. с.

Последняя диаграмма дана для случая поворота ротора против поля, при котором обмотка статора работает в режиме двигателя, а обмотка ротора — в режиме генератора. Энергия передается со статора на ротор, причем последний стремится повернуться по полю.

Для получения диаграммы при $\theta_S - \theta_R = 45^\circ$ от начального радиуса кругов I и $-E$ откладывают углы 45° для статора в отрицательном направлении по часовой стрелке (сдвиг ротора против поля), а для ротора —

против часовой стрелки (для обращенной машины сдвиг против поля равносильен сдвигу обычной машины по полю).

Концы повернутых на угол $\theta_S - \theta_R$ радиусов и будут определять положение на кругах концов векторов I и $-E$.

Если по найденным величинам токов I_S и I_R найти падения напряжения $I_S Z_S$ и $I_R Z_R$ и, исходя из вектора U , нанести их на диаграмму,

концы их как раз упадут в концы векторов э. д. с. $-E_S$ и $-E_R$.

Ордината любой точки окружности I дает в некотором масштабе мощность, забираемую из сети (часть окружности, находящаяся выше оси абсцисс) или отдаваемую в сеть (часть окружности ниже оси абсцисс). Перпендикуляры, опущенные из любой точки окружности на линию моментов, дадут в определенном масштабе соответствующие значения моментов. Максимум момента наступает при $\theta_S - \theta_R = 90^\circ$, т. е. при повороте осей обмотки ротора относительно осей обмотки статора на 90 электрических градусов. Зависимость величины вращающего (статического) момента двигателя двойного питания от угла $\theta_S - \theta_R$ представляет собой синусоиду (рис. 154). Следует отметить, что если пренебречь потерями в двигателе, то центр круга токов (рис. 153) окажется на оси абсцисс, равно как и линия моментов, и тогда подводимая мощность будет после прохождения через машину целиком отдаваться в сеть.

Включение Брюдерлина может быть использовано для определения пусковых моментов каких-либо двигателей. Испытуемый двигатель соединяется своим валом с валом двигателя двойного питания, включенного по схеме Брюдерлина, и при пуске поворачивает ротор последнего двигателя на некоторый угол. При этом отмечают в одной из цепей (статора или ротора) мощность, притекающую по ней, которая, например, при повороте ротора против поля в цепи статора будет иметь значение $P_S = P_\phi + Q_S$, где P_ϕ — электромагнитная мощность, передаваемая со статора на

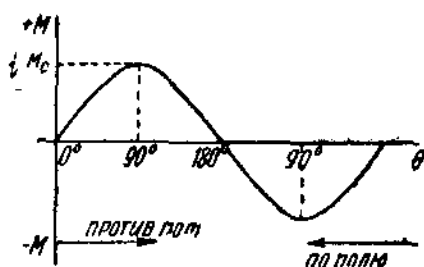


Рис. 154.

ротор, а Q_S — потери в статоре. Отдаваемая в сеть ротором мощность будет иметь значение: $P_R = P_\psi - Q_R$. Затем меняют направление пускового момента (это может быть достигнуто без изменения направления вращения испытуемого двигателя переключением обмоток статора и ротора двигателя двойного питания для изменения направления вращения поля). Тогда двигатель отклоняет ротор машины двойного питания на тот же угол, но в другую сторону по отношению к полю. Если в первом случае отклонение было против поля, то во втором — по полю, причем мощность, протекающая в этом случае в цепи статора, будет:

$$P_S' = P_\psi - Q_S,$$

а в цепи ротора:

$$P_R' = P + Q_R.$$

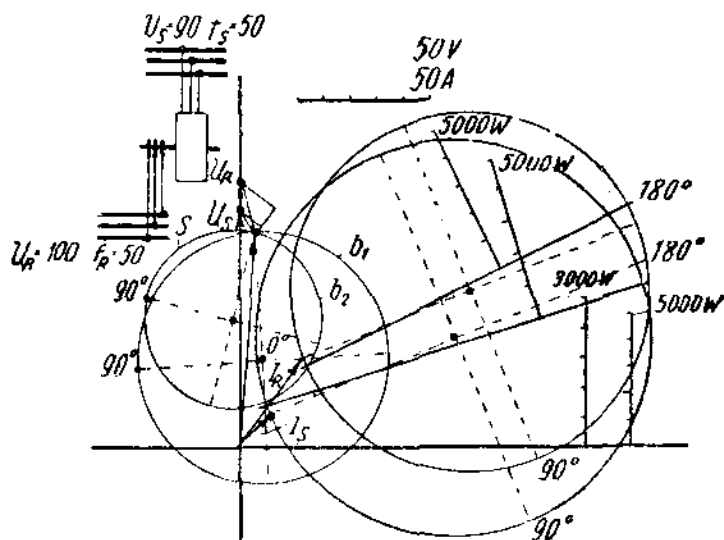


Рис. 155.

Пользуясь данными мощностей в цепи статора или ротора при отклонении последнего в обе стороны от нулевого положения на один и тот же угол, можем вычислить пусковой момент испытуемого двигателя, равный тормозящему моменту двигателя двойного питания:

$$P\Psi = \frac{P_S + P'_S}{2} = \frac{P_R + P'_R}{2} = M \cdot 9,81 \frac{2\pi f}{p}.$$

Практически построение круговой диаграммы может быть выполнено по данным двух точек, полученных из опыта при разных углах поворота ротора (в частности, из опыта холостого хода и короткого замыкания, так же, как при построении диаграммы для асинхронного двигателя).

Общим случаем для схемы Брюдерлина является включение обмоток статора и ротора, обладающих различными параметрами, на неодинаковые напряжения переменного тока одной и той же частоты.

полю мощности, передаваемые со статора на ротор и наоборот, а следовательно и вращающие моменты, различны. На рис. 156 и 155 представлены диаграммы для машины с меньшими потерями на статоре. Поэтому для круга тока I_S линия моментов располагается ниже центра круга, а для круга тока I_R — выше центра. При повороте против поля (рис. 156) мы имеем большую часть окружности, следовательно, значения моментов имеют большую величину при тех же углах, чем при повороте по полю (нижняя часть окружности), так как в последнем случае в роторе расходуется больше энергии, чем в статоре при повороте против поля. Очевидно, что для круга тока I_R при тех же параметрах машины линия моментов должна лежать выше центра, потому что при повороте против поля вектор I_R движется по нижней части окружности, и наоборот. Таким образом величину вращающего момента можно определять по любому из кругов, причем вычисления момента по тому или другому кругу (при различных масштабах) должны дать тождественные результаты благодаря тому, что ротор и статор испытывают по закону действия и противодействия одинаковый (общий) момент.

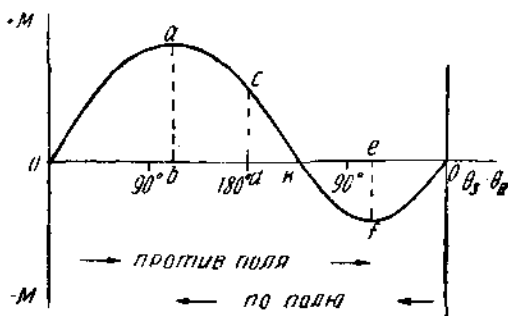


Рис. 157.

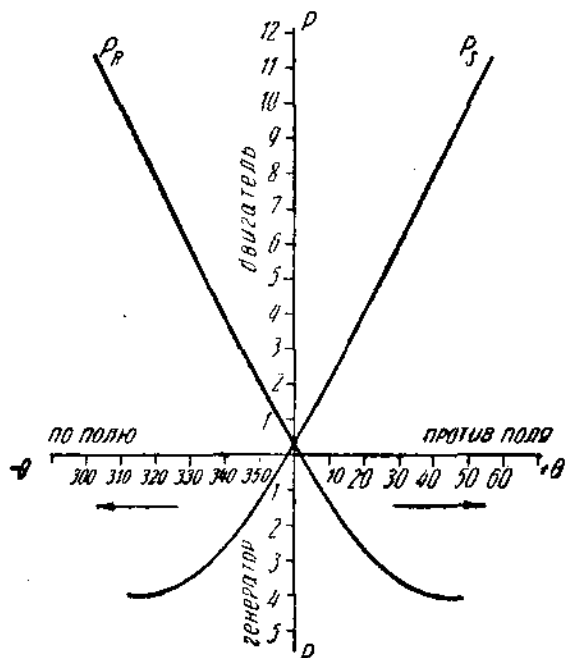


Рис. 158.

ротора против поля на 90° момент не достигает еще своего максимума, который наступает при угле, несколько большем 90° , и имеет значение ab (рис. 156 и 157). При повороте ротора на 180° еще имеется некоторый момент cd , так что ротор, предоставленный самому себе, повернется по полю примерно на 180° и вернется к исходному положению около угла

$\theta_S - \theta_R \approx 0$. Нулевое значение момента наступает при повороте на угол $\theta_S - \theta_R > 180^\circ$ (точка k). За этой точкой момент меняет свой знак (энергия поступает с ротора), поэтому ротор, предоставленный самому себе, повернется на угол меньший, чем kO градусов против поля, и опять-таки придет в положение, близкое к $\theta_S - \theta_R \approx 0$, но с другой стороны. Подобная кривая моментов, как будет указано далее, характерна и для схемы синхронного поворота при помощи трехфазных индукционных двигателей, которые представляют собой в этой схеме по существу двигатели двойного питания, включенные по схеме Брюдерлина, т. е. при вращении полей в одну сторону.

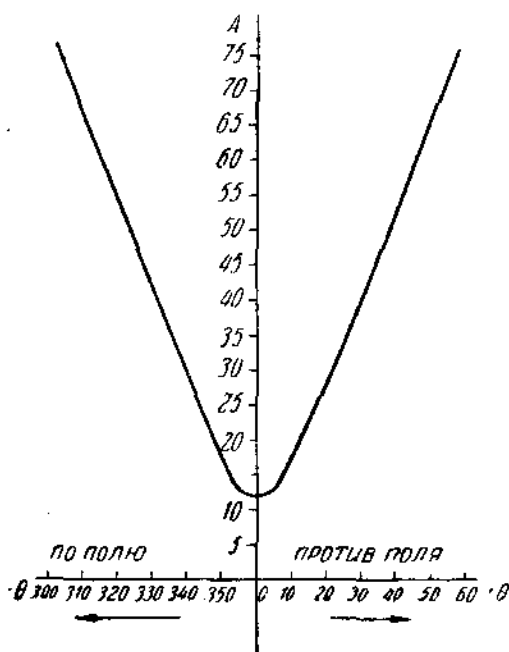


Рис. 159.

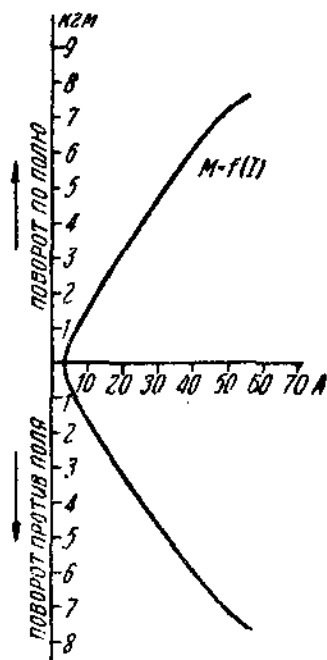


Рис. 160.

Примерные соотношения между мощностями поступающей из сети в одну из обмоток и отдаваемой в сеть другой обмоткой изображены кривыми на рис. 158. Кривые построены в зависимости от угла поворота обмотки ротора относительно обмотки статора.

При повороте ротора против поля мощность на статоре P_S больше, чем мощность на роторе P_R , так как энергия передается со статора на ротор. Сумма этих мощностей $P_S + (-P_R)$ представляет собой потери в машине. При повороте ротора по полю обмотки меняются ролями, благодаря чему мощность P_R оказывается больше мощности P_S .

На рис. 159 представлена примерная зависимость тока одной из обмоток от угла поворота ротора в практически применяемых пределах (до 60 электрических градусов).

При определении вращающего момента не всегда удобно делать независимой переменной угол поворота ротора вследствие затруднительности

точного его отсчета. Удобнее из диаграммы получать значения момента в зависимости от тока в одной из обмоток. При опыте также легче связать ток и вращающий момент (зная ток, можно получить из диаграммы вращающий момент).

Подобная зависимость $M=f(I)$ представлена на рис. 160.

139. Машина двойного питания от двух сетей с разными частотами и при вращении полей в одну сторону. Случай работы двигателя двойного питания от двух сетей с разными частотами при вращении полей в одну сторону уже был представлен на рис. 143 в применении к управлению рулями на судах. Число оборотов двигателя устанавливается в зависимости от частоты на статоре и роторе:

$$n = \frac{60(f_S - f_R)}{p}.$$

В частности при $f_S = f_R$ получаем разобранный выше случай включения Брюдерлина.

Ранее было установлено, что двигатель двойного питания при вращении полей в одну сторону имеет одну из обмоток в режиме двигателя, а другую в режиме генератора, причем, если $f_S \neq f_R$ ($n \neq 0$), то режим двигателя преобладает над режимом генератора.

Пусть двигатель, работающий при $f_S \neq f_R$ и делающий $n = \frac{60(f_S - f_R)}{p}$ оборотов в минуту, нагружен некоторым тормозящим моментом M . Если $f_S > f_R$, то двигатель вращается в сторону вращения поля статора. Следовательно, при некоторой нагрузке на вал ротор сдвинется на угол $\theta_S - \theta_R$ против вращения поля, что вызовет в статоре режим двигателя (приемника), а в роторе — режим генератора. Мощность, передаваемая со статора на ротор, будет равна, как обычно, произведению момента, развиваемого двигателем, на угловую скорость вращающегося магнитного поля в пространстве, т. е.

$$P_{\psi_S} = M\omega_s = M \cdot \frac{2\pi f_S}{p}.$$

Ротор вращается с угловой скоростью

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi(f_S - f_R)}{p}$$

и поэтому развивает на своем валу мощность равную,

$$P_m = M \cdot \frac{2\pi(f_S - f_R)}{p}. \quad (164)$$

Остальная часть переданной со статора на ротор мощности представляет собой электромагнитную мощность ротора

$$P_{\psi_R} = P_{\psi_S} - P_m = M \cdot \frac{2\pi f_S}{p} - M \cdot \frac{2\pi(f_S - f_R)}{p} = M \cdot \frac{2\pi f_R}{p}$$

и является генераторной мощностью, т. е. направлена из обмотки ротора в сеть. Мощность, поступающая в последнюю, равна

$$P_R = P_{\psi_R} - Q_R = mE_R I_R \cos \psi_R - Q_R = mU_R I_R \cos \varphi_R.$$

Таким образом мощность, поступающая из сети с большей частотой, частично превращается двигателем в механическую мощность, а частично трансформаторно передается в сеть с меньшей частотой.

Отношение механической мощности к трансформаторной составляет:

$$\frac{P_m}{P_{\phi R}} = \frac{f_S - f_R}{f_R}. \quad (165)$$

При $f_S = f_R$ механическая мощность на валу равна нулю (включение Брюдерлина) и

$$P_{\psi S} = P_{\phi R} = P_{\psi},$$

т. е. вся мощность, передаваемая со статора, за вычетом потерь в роторе, отдается в сеть. Отсюда следует, что машина двойного питания может быть использована для передачи мощности из одной сети в другую одинаковой с первой частоты.

Действительно, соединив указанной машиной две сети с одинаковыми частотами, можно поворотом ротора против вращения поля направить поток энергии со статора в ротор, т. е. из сети, соединенной со статором, в сеть, соединенную с ротором. При повороте ротора по вращению поля поток энергии получит обратное направление.

Изменяя коэффициент трансформации машины (помощью регулируемого трансформатора и т. п.) можно передавать реактивную мощность из одной сети в другую.

Если частота сети ротора $f_R = 0$, то из выражения (рис. 164) для P_m получаем, что вся мощность, передаваемая со статора на ротор, превращается в механическую мощность, а электромагнитная (трансформаторная) мощность ротора равна нулю. Этот случай является случаем работы нормальной синхронной машины с возбуждением постоянным током ($f_R = 0$). Момент, приложенный к валу по направлению вращения поля статора (при $f_R = 0$), как известно, заставит механическую энергию, подведенную к валу, превращаться в электрическую, отдаваемую за вычетом потерь в сеть с частотой f_S .

При работе машины двойного питания от двух сетей, частоты которых находятся в соотношении $f_S > f_R$, механическая мощность, подведенная к валу машины

$$P_m = M \cdot \frac{2\pi(f_S - f_R)}{p},$$

будет превращаться в электрическую, причем, так как сдвиг ротора в этом случае произойдет по направлению вращения поля, то обмотка статора окажется в режиме генератора, а обмотка ротора, в режиме приемника, благодаря чему последняя будет передавать на статор мощность, равную

$$P_{\phi R} = M \cdot \frac{2\pi f_R}{p}.$$

Следовательно, общая электромагнитная мощность (генераторная) на статоре будет равна

$$P_{\psi S} = P_m + P_{\phi R} = M \cdot \frac{2\pi f_S}{p}.$$

Таким образом, в случае $f_S > f_R$ при торможении вала машины мощность поступает из сети с частотой f_S и частью преобразуется в механическую, а частью передается сети с частотой f_R . Наоборот, при подведении механической энергии к валу машина для сети с частотой f_R является генератором, причем отдаваемая ею мощность частью получается с вала, частью же черпается из сети с меньшей частотой (f_R).

При обратном соотношении между частотами, т. е. при $f_R > f_S$, будет иметь место обратная картина.

Из выражения для n видно, что значение для n в этом случае получится отрицательное, т. е. двигатель пойдет в направлении, обратном тому, которое имело место при $f_S > f_R$, т. е. ротор будет вращаться против вращения поля. Поэтому, если вал нагрузить некоторым моментом, то ротор сдвинется по вращению поля, что создаст для обмотки статора генераторный режим, а для обмотки ротора, режим двигателя. Мощность будет теперь передаваться от ротора к статору

$$P_{\phi R} = M \frac{2\pi f_R}{p}$$

(т. е. опять-таки от сети с большей частотой к сети с меньшей частотой) частично превращаясь в механическую

$$P_m = M \cdot \frac{2\pi (f_R - f_S)}{p},$$

а частично — в трансформаторную

$$P_{\phi S} = M \cdot \frac{2\pi f_S}{p}.$$

Следовательно, можно отметить, что в случае работы машины двойного питания от сетей с разными частотами и при вращении полей в одну сторону в режиме двигателя мощность поступает из сети с большей частотой, разделяясь далее на механическую и трансформаторную мощности. В случае же работы указанной машины в генераторном режиме мощность отдается в сеть с большей частотой, складываясь из механической, поступающей на вал, мощности, и трансформаторной, передаваемой из сети с меньшей частотой. Работу подобного рода двигателя можно рассматривать как совместную работу двух машин: синхронного двигателя, вращающегося со скоростью

$$n = \frac{2\pi (f_S - f_R)}{p},$$

и машины двойного питания в схеме Брюдерлина, связывающей сети с одинаковой частотой, значение которой равно значению меньшей частоты из двух, в действительности имеющихся на зажимах машины.

Следует напомнить, что нормальный синхронный двигатель с возбуждением постоянным током занимает промежуточное положение между двигателем двойного питания с вращением полей в одну сторону и двигателем с вращением полей в разные стороны. При вращении полей в одну сторону часть мощности передается трансформаторно через обмотки машины. В обычной синхронной машине передачи мощности из одной обмотки в другую не имеет места (мощность целиком сообщается валу или наоборот — пре-

вращается в генераторную мощность). При вращении полей в разные стороны обе обмотки находятся в режиме двигателя или в режиме генератора.

Режим работы машины двойного питания при вращении полей в одну сторону подобен режиму работы преобразователя частоты Штейнмеца, представляющего собой каскадное соединение асинхронной машины с синхронной машиной, сидящей с первой на одном валу.¹

Векторная и круговая диаграммы работы машины двойного питания в указанном режиме могут быть получены путем использования общих выражений для машины двойного питания, в которые надлежит подставить соответственные данные, обуславливающие этот режим.

Пусть имеется машина двойного питания со следующими параметрами:

$$\begin{aligned}\dot{z}_S &= \dot{z}_R = 0,1 + j \cdot 0,3; \\ \dot{Y} &= 0,05 + 0,05 - j \cdot 0,2.\end{aligned}$$

Напряжение на статоре $U_S = 100$ В, напряжение на роторе $U_R = 35$ В, $f_S = 50$ Hz и $f_R = 25$ Hz. Следовательно, $s = 0,5$. Половина мощности, передаваемой со статора на ротор в режиме двигателя, отдается на вал, а половина поступает через обмотку ротора в сеть низшей частоты.

Подставляя приведенные выше значения в основные формулы, получим следующие выражения для I_S ; I_R ; $-E_S$; $-E_R$:

$$\begin{aligned}I_S &= (67,3 - j \cdot 141) + e^{-j(\theta_S - \theta_R)} (-45,5 + j \cdot 91); \\ I_R &= (49,3 - j \cdot 98) + e^{+j(\theta_S - \theta_R)} (64,8 - j \cdot 130); \\ -\dot{E}_S &= (51,9 - j \cdot 6,5) + e^{-j(\theta_S - \theta_R)} (31,8 + j \cdot 4,52); \\ -\dot{E}_R &= (15,8 + j \cdot 2,25) + e^{+j(\theta_S - \theta_R)} (26 - j \cdot 3,3).\end{aligned}$$

По этим выражениям строим векторную и круговую диаграммы двигателя (рис. 161). Векторная диаграмма построена для случая $\theta_S - \theta_R = 45^\circ$. Для этого от начального радиуса кругов токов и э. д. с., соответствующего углу $\theta_S - \theta_R = 0$, отложены углы 45° и таким образом найдены концы векторов, а следовательно и сами векторы токов и э. д. с. Следует отметить, что получаемые из диаграммы I_S и I_R значения моментов для одного и того же угла $\theta_S - \theta_R$ равны между собой, так как представляют по существу один момент, а электромагнитные мощности статора и ротора, выражаемые теми же отрезками, что и моменты, относятся как частоты f_S и f_R (см. выше).

В точках M и N момент достигает наибольшего значения, после которого двигатель выпадает из синхронизма. Очевидно, что векторы I_S и I_R приходят в точки M и соответственно при генераторном режиме в точки N одновременно.

Так как $\frac{U_R}{s} = \frac{35}{0,5} = 70 < 100$, то имеет место перевозбуждение со стороны статора, а потому круг тока I_S сдвинут в сторону отставания от напряжения, а круг тока I_R — в сторону упреждения.

¹ См. Arnold.—W. S. T., Bd V₁, S. 520—537.

Разберем теперь случай работы машины двойного питания при неодинаковых параметрах и малой частоте f_R ротора, т. е. при оборотах, довольно близко стоящих к числу оборотов вращающегося поля статора.

Возьмем следующие параметры:

$$z_S = r_S + jx_S = 0,2 + j 0,6;$$

$$z_R = r_R + jx_R = 0,3 + j 0,4;$$

$$\dot{Y} = g_S + g_R - jb = 0,2 + 0,4 - j 0,4.$$

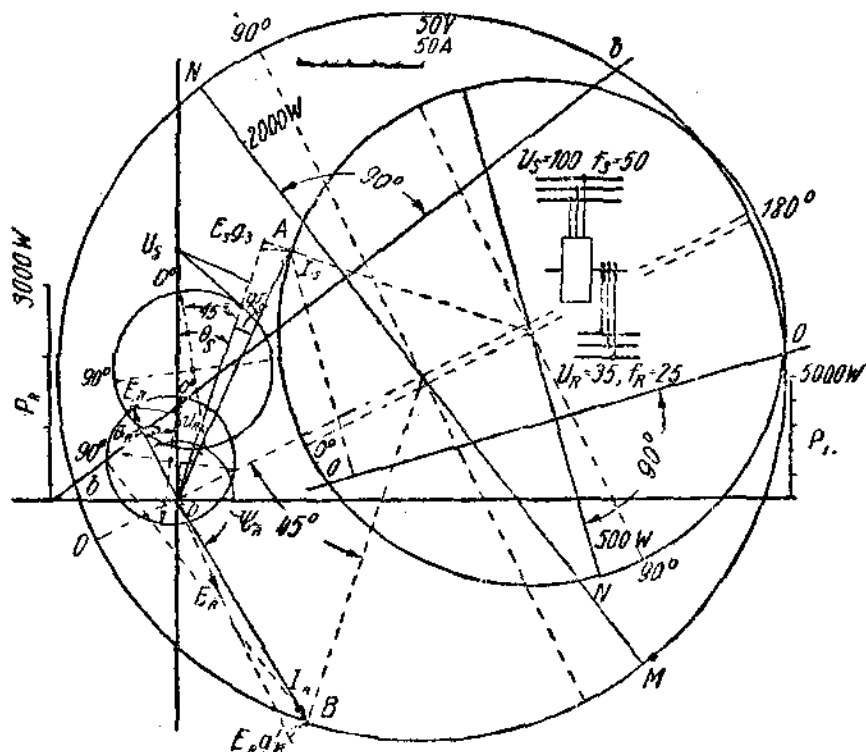


Рис. 161.

Напряжения $U_S = 90$ В и $U_R = 40$ В, $f_S = 50$ Hz, $f_R = 10$ Hz, следовательно $s = 0,2$. Общие выражения для I_S , I_R , $-E_S$, $-E_R$ получат значения:

$$\dot{I}_S = (40,8 - j 45) + e^{-j(90^\circ - 9^\circ R)} \cdot (-70,4 + j 41,6);$$

$$\dot{I}_R = (95,2 - j 47,8) + e^{+j(9^\circ S - 9^\circ R)} \cdot (-31,7 + j 18,7);$$

$$-\dot{E}_S = (55,1 - j 15,4) + e^{-j(9^\circ S - 9^\circ R)} \cdot (39,1 + j 33,9);$$

$$-\dot{E}_R = (7,82 + j 6,79) + e^{+j(9^\circ S - 9^\circ R)} \cdot (11 - j 3,09).$$

Соответствующие круговые диаграммы даны на фиг. 162. Так как

$$\frac{U_R}{s} = \frac{40}{0,2} = 200 > 90,$$

то в данном случае имеет место перевозбуждение со стороны ротора (сравн. с рис. 161, где было перевозбуждение со стороны статора).

Благодаря этому при нормальных условиях статор работает с опережающим током.

В данной машине (плохие параметры) при малой частоте (малая электромагнитная мощность на роторе) и при перевозбуждении со стороны ротора круг тока I_R лежит весь выше оси абсцисс. Это служит свидетельством тому, что в этом случае ротор вообще не может передавать в свою сеть энергии (вся его электромагнитная мощность расходуется в обмотке и, кроме того, часть потерь в роторе еще покрывается за счет сети).

При дальнейшем уменьшении частоты f_R ротор будет увеличивать число оборотов, а его электромагнитная мощность будет становиться все меньше (диаметр круга I_R будет уменьшаться, равно как и диаметр круга E_R), причем ток I_R становится почти целиком током возбуждения. Наконец, при $f_R = 0$ число оборотов ротора равно $n = \frac{60 f_s}{p}$ и машина превращается в обычную синхронную машину с возбуждением постоянным током. Круг I_R превращается в точку, а вектор I_R совпадает с вектором U_R . По величине он равен: $I_R = \frac{U_R}{r_R}$.

Диаграммы для случая $f_R = 2$ Hz (почти постоянный ток) представлены на фиг. 163 для машины с теми же параметрами, что и в диаграммах на рис. 162 ($U_s = 90$; $U_R = 30$; $f_R = 50$ Hz; $f_s = 2$ Hz; $s = 0,04$). Диаметры кругов I_R и E_R почти равны нулю. В нуль они превращаются, как уже было отмечено, при $f_R = 0$. Таким образом диаграмма по рис. 163 уже весьма близко подходит к диаграмме обычной синхронной машины. Далее, при увеличении частоты и изменении порядка следования фаз на роторе получается машина с вращением полей в разные стороны (см. рис. 150). Следует отметить, что при совпадении осей м. д. с. статора и ротора ($\theta_s - \theta_R = 0$) при работе данной машины по диаграмме на рис. 162 машина генерирует в сеть с большой частотой (точка 0° круга I_s находится ниже оси абсцисс).

На рис. 162 дана векторная диаграмма токов I_s и I_R для случая $\theta_s - \theta_R = 90^\circ$.

Выше были рассмотрены несколько случаев работы машины двойного питания при некоторых определенных значениях s , т. е. определенных соотношениях между f_s и f_R . Теперь интересно просмотреть, как будут меняться основные величины в машине при регулировании f_R или f_s , т. е. при регулировании числа оборотов двигателя от нуля до некоторого максимума (нормальный режим работы в схеме синхронной связи).

Вопрос сводится к тому, чтобы установить характер движения конца вектора центра кругов токов, например при изменении частоты f_R . Вообще же из рассмотрения отдельных кругов тока I_s при различных s (рис. 148—150, 155, 161—163) можно отметить, что конец вектора центра кругов перемещается.

Представим общее выражение для I_s (155) в виде суммы двух членов:

$$I_s = \frac{U_s(s + \dot{z}_{R_s}) \dot{Y}_s}{\dot{z}_{R_s} + s \dot{z}_s + \dot{z}_{R_s} \cdot \dot{Y}_s} - \frac{U_R e^{-j(\theta_s - \theta_R)}}{\dot{z}_{R_s} + s \dot{z}_s + \dot{z}_s \dot{Y}_s}.$$

двух двигателей, то по существу будет иметь место одна и та же картина. Разница же в том, что для машины двойного питания скорость при каждом данном s является синхронной, устойчивой скоростью вне зависимости от нагрузки (до опрокидывающего момента, конечно), тогда как в асинхронном двигателе скорость его изменяется с изменением нагрузки.

Таким образом вектор центра круга I_S описывает окружность при изменении s (его выражение в числителе и знаменателе имеют s в первой степени, если считать, что $g_2 s = 0$, т. е. пренебречь потерями в железе ротора).

Второй член выражения для I_S , как уже отмечалось, есть радиус круга I_S , поворачивающийся вокруг конца вектора центра при изменении угла

$\theta_S - \theta_R$, т. е. при изменении нагрузки. Величина этого радиуса при данных параметрах машины зависит от величины напряжения U_R и скольжения s . Если положить $U_R = \text{const}$, то при изменении s величина радиуса круга тока I_S будет изменяться почти обратно пропорционально s .

На рис. 164 представлена диаграмма геометрических мест центров кругов тока синхронной машины двойного питания при изменении скольжения s путем изменения величины f_R ($f_S = \text{const}$) и при U_S и $U_R = \text{const}$ (диаграмма дана для частного случая с теми же параметрами, что и параметры в диаграммах по рис. 162 и 163; $U_S = 100 \text{ V}$; $U_R = 20 \text{ V}$). На

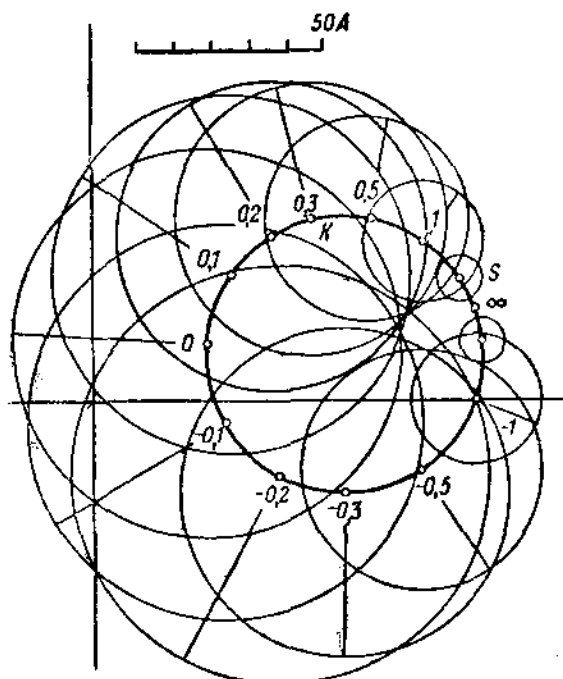


Рис. 164.

рис. 164 жирной линией показана окружность концов вектора центра кругов I_S , причем эта же окружность является геометрическим местом концов векторов тока при работе машины нормальным асинхронным двигателем.

Точками на этой окружности помечены положения конца вектора центра кругов тока I_S при различных скольжениях. Каждая из этих точек соответствует устойчивой работе двигателя при данной частоте f_R , не зависящей от нагрузки. При изменении последней, но постоянном s , вектор тока I_S скользит по окружности при неизменности положения ее центра. При изменении частоты f_R вектор тока I_S переходит с круга, соответствующего прежнему скольжению, — на круг, отвечающий новому скольжению (вернее, — круг тока I_S соответственно перемещается, например, из положения своего центра 0,2 в положение 0,1 и т. д.).

Для ясности на рис. 164 каждый из кругов тока I_S снабжен радиусом, указывающим на положение центра этого круга на окружности K .

Из рис. 164 видно, что поставленное условие $U_R = \text{const}$ при $s = \text{var}$ ведет к уменьшению диаметров кругов при увеличении s . Так, например, если взять скольжение $s = 1$ (включение Брюдерлина), то для получения кругов тока примерно одного и того же диаметра необходимо, чтобы $U_S = U_R$. В случае же диаграммы по рис. 164 $U_S = 100 \text{ V}$ и $U_R = 20 \text{ V}$. Машина получается сильно недовозбужденной со стороны ротора, что и сказывается на величине диаметра круга I_S . Для соблюдения нормального возбуждения двигателя надлежит, чтобы имело место соотношение (при одинаковых параметрах) $U_S = \frac{U_R}{s}$; в частности при $s = 1$ $U_S = U_R$.

Точно таким же образом из рассмотрения остальных выражений (156); (157); (158) вытекает, что центры кругов тока I_R , E_S и E_R при изменении s также располагаются по окружности. На рис. 165 представлена диаграмма для тока I_R при том же частном случае машины, что и диаграмма на рис. 164. Основные выражения показывают, что при $s = \text{const}$ и $\theta_S - \theta_R = \text{var}$ векторы центров кругов I_S и E_S пропорциональны напряжению U_S , а радиусы этих окружностей пропорциональны

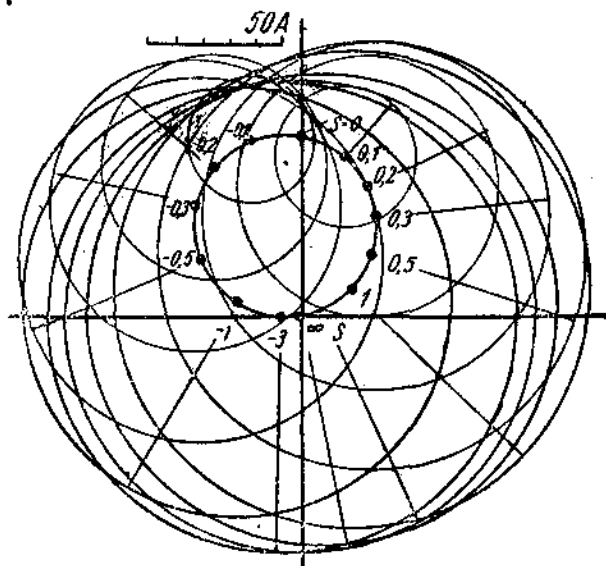


Рис. 165.

напряжению U_R . Для кругов I_R и E_R существует обратная зависимость от напряжений U_S и U_R (векторы центров пропорциональны U_R , а радиусы кругов U_S). Поэтому диаметр кругов I_R , в противоположность кругам I_S с увеличением скольжения увеличивается, а не уменьшается. Очевидно, что, изменяя соответствующим образом напряжение U_R при изменении величины f_R , можно при каждой скорости получить надлежащие распределения токов возбуждения в обмотках машины.

Если при регулировании f_R применен преобразователь числа периодов, питающийся от той же сети, что и обмотка статора и вращаемый от отдельного привода, то интересно установить изменение суммарного тока, потребляемого из сети, принимая во внимание, что часть мощности возвращается обратно в сеть.

Пренебрежем потерями в преобразователе частоты. Тогда можно написать, что ток сети $\dot{I}_c = \dot{I}_S + \dot{I}_R$. Подставляя вместо $\dot{I}_S$ и $\dot{I}_R$ их основные выражения, получим:

$$i_c = \frac{U_S (s + z_{RS} \dot{Y}_s) + U_R (1 + z_S Y_s) - U_R \cdot e^{-j(\theta_S - \theta_R)} - U_S \cdot s \cdot e^{+j(\theta_S - \theta_R)}}{z_{RS} + s \cdot z_S + z_{RS} \cdot z_S \cdot \dot{Y}_s} =$$

$$= [U_S \dot{A} + U_R \dot{B}] + U_R \dot{C} \cdot e^{-j(\theta_S - \theta_R)} + U_S \dot{D} \cdot s \cdot e^{+j(\theta_S - \theta_R)}. \quad (166)^1$$

Полученное выражение (166) представляет собой уравнение эллипса. Вектор центра последнего (рис. 166) равен $\overline{Oa} + \overline{ab} = U_S \dot{A} + U_R \dot{B}$. Остальные два члена, постоянные по величине, имеют операторы поворота в противоположных направлениях двух радиусов $U_R \dot{C}$ и $U_S \dot{D}s$. Вокруг центра эллипса поворачивается радиус $U_S \dot{D}s$, занимая последовательно положения $bd, bf, bu, bp, br...$, а вокруг конца этого радиуса поворачивается в обратном направлении радиус $U_R \dot{C}$, занимая положения de, fg, nm, pq и т. д. и описывая своим концом эллипс $egmq$. Эллипс на рис. 166 построен для определенного значения s .

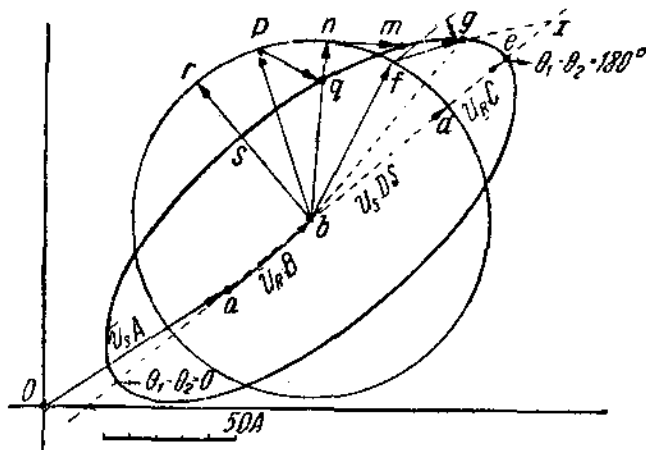


Рис. 166.

При отрицательных значениях s в выражении для I_R меняется знак оператора поворота и поэтому суммарный линейный ток будет описывать круг, так как оба радиуса поворачиваются в одну сторону. Если при $+s$ оба радиуса равны (например включение Брюдерлина при одинаковых параметрах), то эллипс превращается в прямую линию. В случае равенства одного из радиусов нулю (синхронный двигатель с возбуждением постоянным током через преобразователь) эллипс превращается в окружность.

140. Вывод основных выражений для машин двойного питания. Основные выражения (155); (156); (157); (158) для двигателя двойного питания могут быть получены из рассмотрения круговых диаграмм двигателя для общего случая его работы от двух отдельных сетей с различными частотами и напряжениями (рис. 161). На основании векторной диаграммы на рис. 161 можно написать, принимая во внимание равенство моментов, действующих на статор и ротор:

¹ В. Т. Касьянов. — Журн. „Электричество“, 1931 г., № 22, вып. II.

$$I_S \cos \psi_S e^{j\psi_S} + \dot{E}_S g_S = - [\dot{I}_R \cos \psi_R e^{j\psi_R} + \dot{E}_R g_R] e^{-j(\theta_S - \theta_R)}. \quad (1')$$

$$I_S \sin \psi_S e^{-j(90 - \psi_S)} + \dot{I}_R \sin \psi_R e^{+j(\psi_R - 90)} e^{-j(\theta_S - \theta_R)} = \\ = -\dot{E}_S b \cdot e^{-j90}. \quad (2')$$

Здесь ψ_S и ψ_R соответственно углы между током и э. д. с. статора и ротора. (В первом соотношении устанавливается равенство активных составляющих тока статора и приведенного к виткам последнего тока ротора; во втором же соотношении приводится сумма реактивных составляющих машины, дающих общую намагничивающую составляющую последней.)

Из (2') получим:

$$\dot{I}_S \sin \psi_S e^{j\psi_S} = -\dot{E}_S b - \dot{I}_R \sin \psi_R e^{j\psi_S} e^{-j(\theta_S - \theta_R)}. \quad (3')$$

Кроме того можем написать

$$\dot{E}_R = \dot{E}_S \cdot s e^{j(\theta_S - \theta_R)}. \quad (4')$$

Из (1') и (4') определяем:

$$\dot{I}_S \cos \psi_S e^{j\psi_S} = \dot{E}_S (g_S + g_R s) - \dot{I}_R \cos \psi_R e^{j\psi_R} e^{-j(\theta_S - \theta_R)}. \quad (5')$$

Из диаграммы (рис. 161) можем написать:

$$-\dot{E}_R + \dot{I}_R r_R \cos \psi_R e^{j\psi_R} + \dot{I}_R x_R \cdot s \sin \psi_R e^{j\psi_R} = \\ = U_R \cos \theta_R e^{-j\theta_R}; \quad (6')$$

$$\dot{I}_R x_R s \cos \psi_R e^{j\psi_R} - \dot{I}_R r_R \sin \psi_R e^{j\psi_R} = \dot{U}_R \sin \theta_R e^{-j\theta_R}. \quad (7')$$

Умножив (6') на r_R , а (7') на $x_R s$, и сложив, получим:

$$\dot{I}_R \cos \psi_R e^{j\psi_R} = \frac{U_R e^{-j\theta_R} (r_R \cos \theta_R + x_R s \sin \theta_R) + \dot{E}_R r_R}{z_{Rs}^2}, \quad (8')$$

где

$$z_{Rs}^2 = r_R^2 + x_R^2 s^2.$$

Умножив (6') на $x_R s$, а (7') на r_R , и вычитая одно из другого, будем иметь:

$$\dot{I}_R \sin \psi_R e^{j\psi_R} = \frac{U_R e^{-j\theta_R} (x_R s \cos \theta_R - r_R \sin \theta_R) - \dot{E}_R x_R s}{z_{Rs}^2}. \quad (9')$$

Из диаграммы можем написать:

$$-\dot{E}_S + \dot{I}_S r_S \cos \psi_S e^{j\psi_S} + \dot{I}_S x_S \sin \psi_S e^{j\psi_S} = U_S \cos \theta_S e^{-j\theta_S} \quad (10')$$

$$\dot{I}_S x_S \cos \psi_S e^{j\psi_S} - \dot{I}_S r_S \sin \psi_S e^{j\psi_S} = U_S \sin \theta_S e^{-j\theta_S}. \quad (11')$$

Из (10') с помощью (5') и (3') и далее с помощью (8') и (9') находим

$$\begin{aligned} \dot{E}_S \{z^2_{R_s} [1 + r_S (g_S + g_{RS}) + x_S b] + s (r_S r_R + x_S x_{RS})\} = \\ = U_S z^2_{R_s} \cos \theta_S e^{-j\theta_S} - U_R e^{-j\theta_S} [r_S r_R \cos \theta_R + \\ + r_S x_{RS} \sin \theta_R - x_S r_R \sin \theta_R + x_S x_{RS} \cos \theta_R]. \end{aligned} \quad (12')$$

Из (11') с помощью (3') и (5') и далее с помощью (8') и (9') получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}_S \{z^2_{R_s} [x_S (g_S + g_{RS}) - r_S b] + s (x_S r_R - r_S x_{RS})\} = \\ = e^{-j\theta_S} [-U_S z^2_{R_s} \sin \theta_S + U_R (r_S x_{RS} \cos \theta_R - r_S r_R \sin \theta_R) - \\ - U_R (x_S r_R \cos \theta_R + x_S x_{RS} \sin \theta_R)] \end{aligned} \quad (13')$$

Умножаем (13') на $+j$ и складываем с (12'); тогда, имея в виду, что

$$(r_S + jx_S)(r_R - jx_{RS}) = r_S r_R + x_S x_{RS} + j(x_S r_R - r_S x_{RS})$$

и

$$g_S + g_{RS} - jb = \dot{Y}_S,$$

находим окончательно

$$-\dot{E}_S = \frac{U_S \dot{z}_{R_s} + U_R \dot{z}_S e^{-j(\theta_S - \theta_R)}}{\dot{z}_{R_s} + s \dot{z}_S + \dot{z}_S \dot{z}_{R_s} \cdot \dot{Y}_S}. \quad (14') \text{ и } (156)$$

Из диаграммы можем написать:

$$U_S = -\dot{E}_S + \dot{I}_S \dot{z}_S. \quad (15')$$

Из (15') с помощью (14') получаем окончательно:

$$\dot{I}_S = \frac{U_S (s + \dot{z}_{R_s} \dot{Y}_S - U_R e^{-j(\theta_S - \theta_R)})}{\dot{z}_{R_s} + s \dot{z}_S + \dot{z}_S \dot{z}_{R_s} \cdot \dot{Y}_S}. \quad (16') \text{ и } (155)$$

Для определения $\dot{E}_R$ и $\dot{I}_R$ следуют по тому же пути, имея в виду лишь величины ротора и начиная с уравнения (5'), вместо которого будем иметь

$$\dot{I}_R \cos \psi_R e^{j\psi_R} = \frac{\dot{E}_R}{s} (g_S + g_{RS}) - \dot{I}_S \cos \psi_S e^{j\psi_S} e^{+j(\theta_S - \theta_R)}$$

и т. д.

В результате получим приведенные выше выражения (157); (158) для $-\dot{E}_R$ и $\dot{I}_R$.

141. Примеры применения двигателя двойного питания с вращением полей в одну сторону. На рис. 143 уже был приведен один из примеров применения двигателя двойного питания для управления рулями без механической связи между командным постом и рабочей осью. Подобная же схема служит для наводки орудий и поворота орудийных башен на военных кораблях, причем автоматический поворот осуществляется в результате воздействия при повороте зрительной трубы на цепь возбуждения шунтового первичного двигателя, приводящего во вращение

синхронный трехфазный генератор, питающий одну из цепей двигателей двойного питания, другая цепь которых присоединена к трехфазной судовой установке с неизменным числом периодов.

Трехфазный индукционный двигатель двойного питания нашел также применение для синхронизирования генератора с сетью, а также для пуска и автоматического доведения его числа оборотов до синхронного. В последнем случае двигатель работает при изменяющемся числе периодов в одной из его обмоток.

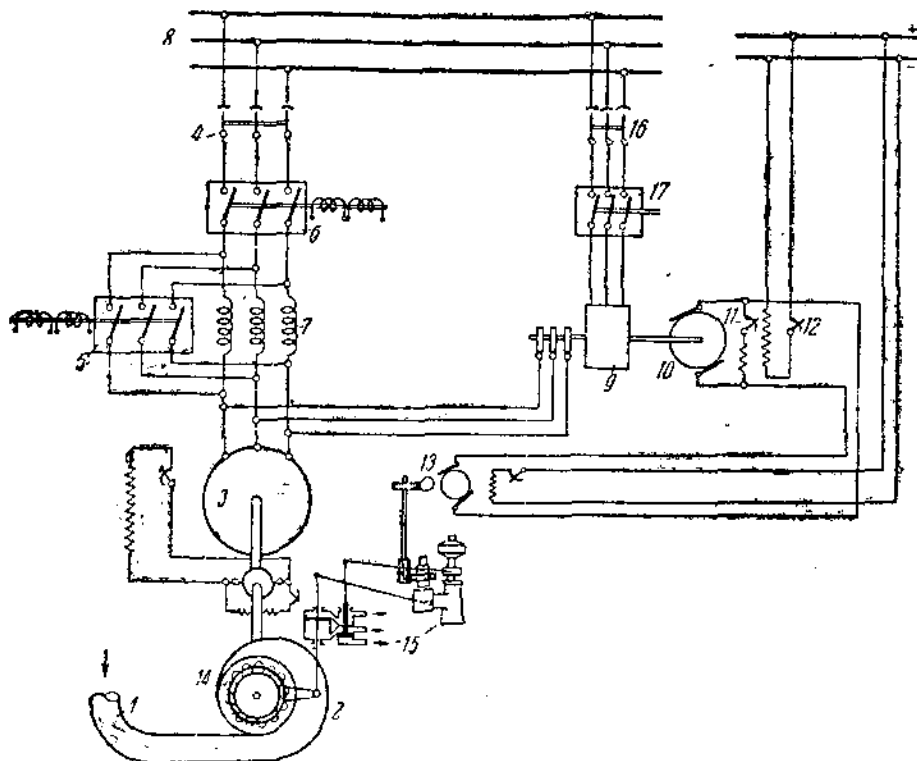


Рис. 167.

Одна из подобных схем изображена на рис. 167.¹ В ряде установок с сильно колеблющейся нагрузкой приходится при возрастании последней быстро разворачивать до синхронного числа оборотов и включать в сеть отдельные генераторы.

При пуске первичного двигателя необходимо сперва сообщить двигателю большое ускорение, а затем, уменьшая его, плавно подвести генератор к синхронному числу оборотов. Для этой цели фирмой AEG применен двигатель двойного питания 9, который одной своей обмоткой приключен к общей сети переменного тока 8, а другой — к линии подключаемого синхронного генератора 3. (При значительном напряжении сети подключение двигателя производится через трансформатор.) Двигатель 9 жестко

¹ Герм. патент № 525002 от 1931 г.

связан с валом генератора постоянного тока 10, имеющего шунтовую обмотку 11 и обмотку 12 независимого возбуждения. На зажимы указанного генератора 10 приключен серводвигатель 13 с отдельной обмоткой возбуждения, который механически связан с регулирующим число оборотов гидравлической турбины 2 устройством 15, которое управляет установкой направляющих лопаток 14.

Для пуска турбины достаточно замкнуть выключатели 16 и 17 в цепи статора двигателя двойного питания 9, благодаря чему последний придет во вращение как асинхронный двигатель. Обмотка его ротора будет замкнута через обмотку неподвижного в первый момент генератора 3. Двигатель 9 приведет во вращение генератор 10, благодаря чему на зажимах серводвигателя возникает напряжение и он начнет воздействовать на устройство 15, которое открывает доступ воде по трубе 1 в турбину, начинающую вращаться, вместе с генератором 3. Последний при своем вращении подает на кольца двигателя 9 некоторое напряжение сперва небольшой периодичности, благодаря чему указанный двигатель, работая теперь как двигатель двойного питания с вращением полей в одну сторону, начинает с возрастанием частоты на кольцах плавно уменьшать число оборотов.

Это обстоятельство заставляет серводвигатель также снижать обороты (уменьшается на его зажимах напряжение), что в свою очередь уменьшает ускорение, получаемое турбиной. При достижении одинакового числа периодов на статоре и роторе двигателя 9 последний останавливается, в силу чего прекращается увеличение числа оборотов у турбины, которая дает число оборотов, близкое к синхронному. Далее остается одним из известных способов включить генератор 3 в сеть.

Двигатель двойного питания нашел весьма большое распространение в тех автоматических схемах, где требуется выполнение регулирования, включения и т. п., в зависимости от соотношения двух или нескольких частот или скоростей вращения рабочих валов.

ГЛАВА XXIII.

АСИНХРОННЫЕ РЕЖИМЫ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ.

142. Введение. Кроме приведенных выше синхронных режимов машины двойного питания от одной или двух отдельных сетей возможны также для машины двойного питания и асинхронные режимы (как режим двигателя, так и режим генератора).

Указанные режимы не являются рабочими режимами в схемах синхронной связи, а возникают как побочные режимы при нарушении синхронизма, например вследствие перегрузки или внезапных толчков, испытываемых передающим и принимающим устройством. Это обстоятельство вызывает необходимость краткого рассмотрения этих режимов, которое также интересно и с точки зрения общего освещения вопроса о машине двойного питания.

Так же, как и в синхронных режимах последней, в данном случае надлежит различать два основных режима двигателя двойного питания, а именно: режим при вращении полей статора и ротора в разные стороны и режим при вращении их в одну сторону. В обоих случаях вообще может иметь место как режим двигателя, так и режим генератора, причём

питание обмоток может происходить от одной общей сети или от двух различных с разными напряжениями и частотами.

143. Асинхронный режим при вращении полей в разные стороны. Если двигатель двойного питания, работающий в синхронном режиме при вращении полей в разные стороны, по каким-либо причинам выпал из синхронизма, то он может перейти в асинхронный режим при числе оборотов, близком к синхронному (при синхронном режиме двигатель вращался с двойным числом оборотов при питании от одной сети).

Для уяснения его работы представим себе предварительно два асинхронных двигателя — один с питанием со статора, а другой — с питанием с ротора.

При питании со статора и замкнутом накоротко роторе последний будет вращаться в сторону вращения поля статора с числом оборотов, меньшим синхронного на величину скольжения:

$$n = n_1 - n_1 s = n_1 (1 - s).$$

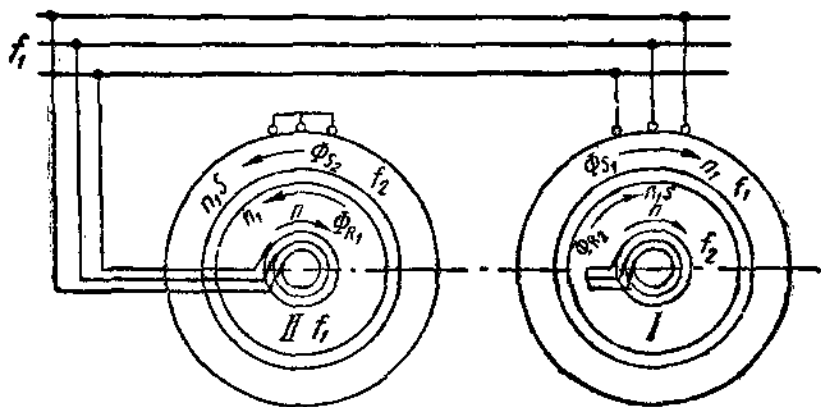


Рис. 168.

Число же оборотов в пространстве полей статора и ротора окажется равным

$$n_1 = \frac{f_1 60}{p},$$

так как поле ротора по ротору будет делать

$$n_2 = \frac{s f_1 60}{p}$$

оборотов, а следовательно в пространстве $n + n_2 = n_1$. Второй двигатель питается с ротора (статор замкнут накоротко), причем направление вращения его поля взято обратным направлению поля статора в первом двигателе. Как известно, ротор в таком обращенном двигателе придет во вращение в сторону, противоположную вращению поля ротора (обстоятельство, имеющее место во всех обращенных двигателях переменного тока, например, одноякорный преобразователь, двигатель Шраге и др.). Следовательно, ротор такого обращенного двигателя будет вращаться

в ту же сторону, что и при питании со статора, если в случае обращенного двигателя поле ротора будет вращаться в сторону, противоположную вращению поля статора при питании двигателя со статора. Число оборотов ротора будет несколько менее синхронного, а именно на величину скольжения, причем, благодаря разным направлениям поля ротора по ротору и самого ротора, поле ротора в пространстве будет вращаться с разностью оборотов $n_2 = n_1 - n$, причем с направлением вращения в сторону, противоположную вращению самого ротора.

Следовательно, с этим же числом оборотов $n_2 = n_1 s$ поле будет пересекать короткозамкнутую обмотку статора, возбуждая в ней вторичный ток частоты скольжения $f_2 = f_1 s$. Если разобранные выше двигатели совершенно одинаковы, то их роторы могут быть механически соединены для работы на один вал. Подобный случай изображен на рис. 168, где на одном валу сидят роторы двух асинхронных двигателей *I* и *II*, из которых один (*I*) выполнен с питанием со статора, а другой (*II*) — с питанием с ротора. Для того, чтобы роторы обоих двигателей вращались в одну сторону, нужно направление первичным полям Φ_{S_1} в двигателе *I* и Φ_{R_1} в двигателе *II* дать в противоположные стороны. Число оборотов поля в пространстве в двигателе *I* равно:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p},$$

а в двигателе *II*

$$n_1 s = \frac{60 f_1 s}{p} = \frac{60 f_2}{p}.$$

В табл. X даны основные соотношения частот и чисел оборотов ротора и полей для обеих машин.

ТАБЛИЦА X.

Двигатель	Частота на роторе	Частота на статоре	Направл. вращен. и число оборотов ротора	Направл. вращен. первичн. полей относит. вращен. ротора	Число оборот. поля статора относит. статора	Число оборот. поля ротора относит. ротора	Число обор. и направление вращен. поля машины в пространстве
<i>I</i>	$f_1 s$	f_1	$n = n_1 (1-s)$	$\curvearrowright$	n_1	$n_1 s$	$n_1 \curvearrowright$
<i>II</i>	f_1	$f_1 s$	$n = n_1 (1-s)$	$\curvearrowleft$	$n_1 s$	n_1	$n_1 s \curvearrowleft$

Очевидно, что при совместной работе указанных машин на один вал последний может быть нагружен на двойную мощность по сравнению с мощностью каждой из машин.

Если мы мысленно совместим двигатели *I* и *II* в одну машину, то тем самым перейдем к асинхронной машине двойного питания, имеющей одну обмотку на статоре и одну обмотку на роторе, причем обе эти обмотки присоединены к сети.

В таком случае ни одна из обмоток не будет замкнута накоротко, а каждая из них окажется замкнутой на два параллельно включенных сопротивления: сопротивление питающей сети и сопротивление другой обмотки машины. Так, например, обмотка ротора, как вторичная обмотка для питаемого от сети статора, будет замкнута на сопротивление сети (генератора или трансформатора и линии) Z_c и параллельно соединенное с последним сопротивление обмотки статора z_s .

Таким же образом обмотка статора, как вторичная обмотка для питаемого от сети ротора, будет замкнута на сопротивление Z_c и z_s . Следовательно, как и в исходных двигателях по рис. 168, в двигателе двойного питания в одном случае обмотка статора является первичной, а в другом — вторичной, равно как и обмотка ротора.

Благодаря этому в обеих обмотках будут одновременно протекать токи частоты f_1 и частоты f_1s . Соотношения всех величин в каждой обмотке получатся, если мы на таблице X совместим нижнюю графу (двигатель II) с верхней графой (двигатель I). Тогда окажется, что для обеих обмоток получаются совершенно одинаковые условия, так как их будут пересекать два потока, вращающиеся в пространстве в противоположные стороны с числом оборотов n_1 и n_1s . Если сделать предположение, что в двигателе обмотки статора и ротора во всех отношениях тождественны, то все явления, происходящие в них, будут совершенно одинаковы.

Токи в статоре и роторе в каждый момент времени будут равны по величине и направлены в точках присоединения обмоток навстречу. Поэтому по существу надо считать, что каждая из вторичных обмоток замкнута на сопротивление Z_c . Таким образом в одном корпусе двигателя двойного питания совмещены как бы два независимых трехфазных асинхронных двигателя, в одном из которых первичной обмоткой является статор, а вторичной — ротор, замкнутый через сопротивление сети Z_c ; во втором, наоборот, первичной обмоткой служит ротор, статор же является вторичной обмоткой, замкнутой через то же сопротивление сети.

Следовательно, вторичные токи низкой частоты будут замыкаться через обмотку генератора или трансформатора, складываясь между собой как токи двух параллельных ветвей.

Машина имеет два результирующих потока Φ_{SR} и Φ_{RS} , из которых поток Φ_{SR} имеет в пространстве скорость $\omega_s = \frac{2n f_1}{p}$, а поток Φ_{RS} — скорость $\omega_R = \frac{2n f_1 s}{p}$ и вращается в сторону, противоположную вращению первого. Друг относительно друга потоки Φ_{SR} и Φ_{RS} имеют скорость, соответствующую сумме частот f_1 и f_1s и поэтому взаимодействовать не будут. Каждое из полей, взаимодействуя с током соответствующей ему вторичной цепи двигателя, создает свой вращающий момент M_{SR} и M_{RS} .

Так как $\Phi_{SR} = \Phi_{RS}$ и обмотки тождественны, то $M_{SR} = M_{RS}$, в силу чего общий вращающий момент двигателя равен: $M = M_{SR} + M_{RS} = 2 M_{SR}$ (два двигателя, работающие на один вал).

Отсюда очевидно, что если приключить к сети двигатель обеими обмотками с различным следованием фаз, то он пойдет как асинхронный, т. е. окажется в асинхронном режиме двигателя двойного питания. Для получения же синхронного режима при двойной синхронной скорости нужно предварительно развернуть его от вспомогательного двигателя и синхронизировать с сетью. Следовательно, если при включении по схеме Брюдер-

лина перепутать концы на статоре или роторе, то вместо положения покоя, соответствующего этому включению, двигатель придет во вращение с асинхронной скоростью.

То же самое явление, как будет указано далее, может иметь место при неправильном включении в схеме синхронной связи с трехфазными асинхронными двигателями. Так как оба тока нормальной частоты и низкой частоты одновременно проходят по обмоткам, то результирующий ток в каждой обмотке определится как корень квадратный из суммы квадратов действующих значений обоих токов:

$$I_S = I_R = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}.$$

В связи с возможностью получения от асинхронного двигателя двойного питания двойной мощности по сравнению с асинхронным двигателем тех же размеров, но одностороннего питания, возникает вопрос о применении его вместо последнего. Однако исследования показали, что предполагаемые преимущества двигателя двойного питания практически оказываются не-реальными.

Нормальная мощность двигателя двойного питания будет определяться допустимыми потерями в меди каждой из обмоток. Пренебрегая разницей между первичным и вторичным токами, которая имеет место благодаря намагничивающему току, можем считать $I_1 = I_2$, тогда

$$I_S = I_R = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} = I_1 \sqrt{2}.$$

Вместе с тем необходимо чтобы $I_S = I_R$ не превосходили $I_{\text{норм}}$, следовательно

$$I_1 = \frac{I_{\text{норм}}}{\sqrt{2}}.$$

Так как имеем две машины, то общая мощность будет определяться как мощность, соответствующая двойному току:

$$2 I_1 = \frac{I_{\text{норм}}}{\sqrt{2}} \cdot 2 = 1,41 I_{\text{норм}},$$

т. е. мощность двигателя двойного питания будет лишь на 41% более мощности того же двигателя при одностороннем питании. Если положить, что $I_2 = 0,75 I_1$, то получим не 41%, а 60% увеличения мощности. Однако этот вывод справедлив лишь при $Z_C = 0$. В случае $Z_C \neq 0$ (генератор или трансформатор небольшой мощности) двигатель будет иметь во вторичных своих цепях увеличенные активное и реактивное сопротивления, что скажется на мощности и к. п. д. в сторону их уменьшения. (На рис. 169 изображены эквивалентные схемы двух двигателей, составляющих двигатель двойного питания. На этих схемах r_c и x_c — параметры сети. Значки S относятся к параметрам сети, когда ее считают в цепи статора, а значки R соответственно — в цепи ротора.) Вместе с тем в достаточно насыщенной машине одновременное существование двух потоков вызовет уменьшение магнитной проводимости и увеличение намагничивающего тока.

Такое увеличение намагничивающего тока ведет к тому, что нормальная мощность каждой из машин, составляющих двигатель двойного питания, уменьшается по сравнению с мощностью при одностороннем питании. Следовательно, результирующая мощность машины двойного питания не получится в 1,4—1,6 раз более, чем при одностороннем питании, как это было установлено выше. В некоторых случаях эта мощность может получиться даже меньшей, чем в обычном двигателе.

Кроме того, ток частоты скольжения, замыкающийся через генератор, вызывает ряд нежелательных побочных явлений. В частности, он может сказаться на напряжении генератора, дающем в случае одновременного снабжения последним энергией осветительных установок ощутимое глазом мерцание света.

В силу указанных обстоятельств широкого практического применения двигатель двойного питания в асинхронном режиме не нашел.

Для схем синхронной связи подобный режим работы имеет значение лишь как ненормальный режим при нарушении синхронизма между отдельными элементами схемы, т. е. при выпадении двигателя двойного питания из синхронного режима под влиянием резкого толчка, чрезмерной перегрузки и т. п.

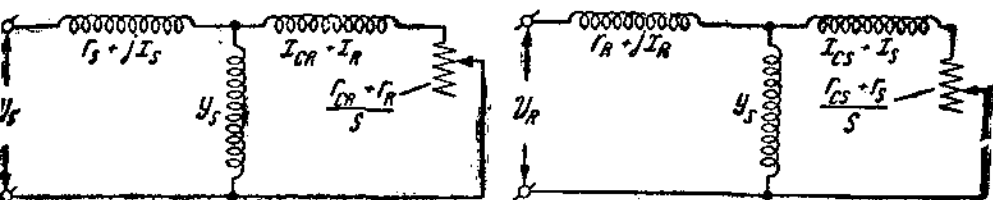


Рис. 169.

144. Асинхронный режим при вращении полей в одну сторону. При включении машины двойного питания на одну сеть при вращении полей в одну сторону ротор, как было указано выше, остается в покое. Однако при чрезмерном моменте на валу или внезапных толчках он, как и в случае двигателя двойного питания с вращением полей в разные стороны, может выпасть из синхронизма и при некоторых условиях начать вращаться с асинхронной скоростью.

В возможности существования такого режима легко убедиться при рассмотрении моментов, действующих на ротор, приведенный во вращение в какую-нибудь сторону.

Допустим, что ротор вращается по направлению вращения полей статора и ротора с некоторым числом оборотов n . В этом случае также можно считать, что двигатель двойного питания состоит из двух асинхронных машин, вторичные обмотки которых замкнуты на сопротивление сети Z_C .

Рассмотрим сначала работу машины с питанием со статора. Вращающееся магнитное поле Φ_{S1} последнего делает в пространстве $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ оборотов в минуту. Ротор вращается в эту же сторону с числом оборотов n . Следовательно, поле статора вращается относительно ротора с числом оборотов $n_1 - n$, создавая в обмотке ротора ток частоты $f_2 = f_1 s$ (как

в обычном асинхронном двигателе), замыкающийся через сопротивление сети. Указанный ток создает поле Φ_{R2} , вращающееся по ротору с числом оборотов $n_2 = n_1 - n$ и неподвижное относительно поля Φ_{S1} . Поля Φ_{S1} и Φ_{R2} образуют результирующее поле Φ_{SR} , вращающееся в пространстве с числом оборотов n_1 и взаимодействующее с током ротора частоты f_{1s} , в результате чего возникает вращающийся момент по вращению поля статора так же, как и в обычном асинхронном двигателе.

Перейдем теперь к рассмотрению второй машины с питанием с ротора и вторичной обмоткой на статоре.

Так как обмотка ротора приключена к сети, то по ней проходит ток частоты сети f_1 и создает поле Φ_{R1} , вращающееся относительно ротора в сторону вращения последнего с синхронной скоростью $n_1 = \frac{60f_1}{p}$. Следовательно, в пространстве поле Φ_{R1} вращается с суммарным числом оборотов, равным $n_1 + n = n_1 + n_1(1-s) = n_1(2-s)$, т. е. с почти двойной синхронной скоростью. Указанное поле Φ_{R1} индуцирует в обмотках статора э. д. с. частоты $f_1(2-s)$, которая благодаря тому, что обмотка статора замкнута на сопротивление линии (генератора), создает вторичный ток частоты $f_1(2-s)$. Последний вызывает поле Φ_{S2} , вращающееся в пространстве с числом оборотов $n_1(2-s)$ и неподвижное относительно поля Φ_{R1} . Поля Φ_{R1} и Φ_{S2} создают результирующее поле Φ_{RS} , вращающееся в пространстве со скоростью $n_1(2-s)$. Оба результирующих потока Φ_{SR} и Φ_{RS} не являются неподвижными друг относительно друга и поэтому среднее значение создаваемого ими момента равно нулю. Вторая машина также создает момент, но направленный в сторону, противоположную вращению ротора (тормозной момент). Действительно, ранее указывалось, что при питании асинхронного двигателя с ротора последний вращается в сторону, противоположную вращению поля по ротору. В данном же случае имеет место вращение ротора в сторону вращения его поля, что дает режим тормоза. Однако момент первой машины будет больше, чем второй, благодаря тому что вторичный ток первой имеет частоту sf_1 , а второй — $(2-s)f_1$. Поэтому результирующий момент $M = M_1 - M_2 \neq 0$.

Рассмотренный асинхронный режим можно сравнить с режимом работы однофазного асинхронного двигателя, пульсирующее поле статора которого рассматривается как два вращающихся в противоположные стороны поля. Следует отметить, что поля на статоре и роторе, вращающиеся в одну сторону, равносильны по направлению создаваемых ими моментов двум полям на статоре, вращающимся в разные стороны, так как, чтобы сохранить направление момента, создаваемого полем, нужно при переносе поля с ротора на статор или наоборот менять направление вращения поля. Если положить скольжение равным s для первой машины (с питанием со статора), а $(2-s)$ — для второй машины (с питанием с ротора), то: 1) при изменении s от 0 до 1 первая машина, как уже было установлено, работает двигателем, а вторая тормозом; 2) при изменении s от 1 до 2 первая — тормозом, а вторая — двигателем; 3) при $s = 2 \div +\infty$ первая — тормозом, вторая — генератором и, наконец, 4) при $s = 0 \div -\infty$ первая — генератором, вторая — тормозом. Таким образом, так же, как и в однофазной асинхронной машине, одна из составляющих двигатель двойного питания машин всегда будет работать тормозом.

Переход двигателя с вращением полей в одну сторону к асинхронному режиму при выпадении из синхронизма может быть уяснен из рассмотре-

ния кривой моментов двигателя при неравных потерях в цепи статора и ротора. На рис. 157 изображена подобная кривая для случая больших потерь в цепи ротора. Если последний под действием какого-либо момента поворачивается по полю, то энергия поступает с ротора на статор и имеет место нижняя ветвь кривой. При значении момента, равном ef , двигатель выпадает из синхронизма и ротор быстро проходит по неустойчивой части $fkca$, приобретая живую силу и создавая неравенство частот вторичных токов для статора и ротора, что позволяет ротору перейти устойчивое положение около нуля и продолжать вращаться в данном случае по вращению поля. Наоборот, если потери больше в статоре, то возможно возникновение режима при вращении ротора против вращения поля. Очевидно, при сильных толчках и больших начальных ускорениях, а также при предварительном разворачивании ротора двигатель при вращении полей в одну сторону может работать в асинхронном режиме и при равенстве потерь в статоре и роторе. Следует отметить, что практического значения асинхронный режим при вращении полей в одну сторону, конечно, иметь не может благодаря наличию тормозящего момента от одного поля (ослабленный результирующий момент, плохой к. п. д. и т. д.). Указанный режим интересен лишь как нарушение синхронного режима в двигателе двойного питания с вращением полей в одну сторону, к которому принадлежат и индукционные двигатели в схемах синхронной связи.

В. ИНДУКЦИОННЫЕ МАШИНЫ В СХЕМАХ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ С НЕИЗМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ.

ГЛАВА XXIV.

ИНДУКЦИОННЫЕ МАШИНЫ В СХЕМАХ НА ТРЕХФАЗНОМ ТОКЕ.

145. Введение. Рассмотренные выше электрические машины в схемах синхронной связи работают на принципе изменения частоты от нуля до некоторого максимума. Существует большой класс схем синхронной связи, работающих при неизменной частоте питающей сети на принципе изменения э. д. с. передатчика по фазе или величине по отношению к э. д. с. приемника.

В этих схемах в качестве приемников применяются машины, выполненные по типу однофазных или трехфазных бесколлекторных асинхронных двигателей, а в качестве передатчиков — преобразователи напряжения по величине или фазе. Обычно таким преобразователем является машина, подобная приемнику, т. е. машина, выполненная по типу бесколлекторного асинхронного двигателя. Однако в некоторых установках применяются коллекторные преобразователи фазы, частоты и др. (например преобразователи электронного типа и т. п.). В дальнейшем мы в основном остановимся на приемниках и передатчиках, выполненных одинаково по типу бесколлекторных асинхронных машин как наиболее часто применяемых в схемах подобного рода. Следует отметить, что нередко указанные схемы называют индукционными схемами по типу применяемых в них машин.

Применяются два основных вида схем: на трехфазном токе и однофазном. И те и другие получили весьма большое распространение, причем оба вида имеют свои индивидуальные преимущества, не позволяющие отдать какому-либо из них явное предпочтение.

В случае необходимости передавать на расстояние лишь приказания при помощи стрелки применяется преимущественно система на однофазном токе как имеющая при правом и левом вращении одинаковый режим работы, а следовательно и одинаковую точность. К этому же следует присовокупить необходимость лишь в двух питающих проводах вместо трех.

Для получения же значительных моментов на валу ведомого двигателя более применима система на трехфазном токе как дающая значительно больший момент при тех же габаритах машин. Это обстоятельство позволяет последнюю систему применять для непосредственного привода рабочего механизма, а также для поддержания синхронизма двух или нескольких приводных двигателей, например в бумажной промышленности, для подъема ферм больших мостов и т. п.

Системы с индукционными двигателями носят также название самосинхронизирующихся систем, т. е. систем, не требующих после включения их

в сеть какого-либо согласования ведомых и ведущих осей. Такое название справедливо в том случае, если система с двух-полюсными машинами работает в пределах лишь одного оборота, т. е. работает без редуктора скорости между приемником и исполнительным меха-

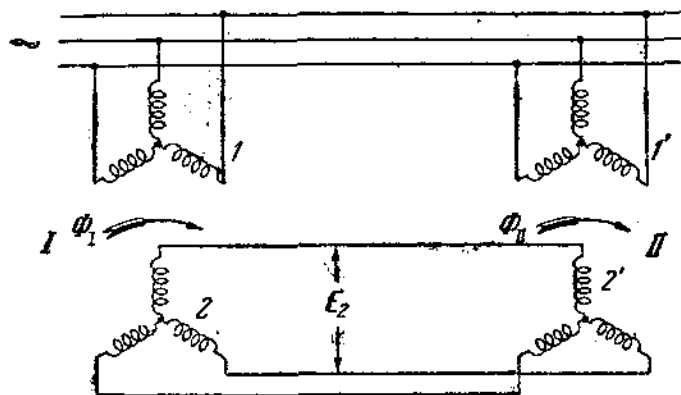


Рис. 170.

низмом, также действующим в пределах одного оборота. В случае же работы с рядом оборотов или применения многополюсных машин, при одном обороте указанная система теряет свое весьма ценное свойство самосинхронизации.

Индукционные машины, входящие в схему, работают в синхронном режиме двигателя двойного питания при вращении полей в одну сторону. Связь между потоком и осью осуществляется электромагнитным путем и является эластичной, в силу чего точность передачи зависит от величины передаваемого момента.

Системы на однофазном токе для передачи указаний на расстоянии за границей применяются фирмами AEG, Siemens и GEC. Для этих же целей итальянскими фирмами Riva в Милане и Calzoni в Болонье применяются системы на трехфазном токе.

Кроме того, последние системы, как уже отмечалось, широко используются для передачи больших моментов и синхронизирования нескольких рабочих валов (AEG и Siemens).

146. Принцип действия. В простейшем своем виде схема синхронной связи с индукционными двигателями представляет собой соединение одного приемника с одним передатчиком, изображенное на рис. 170. Здесь применены две индукционные машины I и II, из которых одна (например I)

является передатчиком, а другая (например II) приемником. Машины выполнены совершенно одинаково и с одинаковым порядком следования фаз включены на сеть неизменной частоты своими первичными обмотками, которыми могут быть как обмотки статора, так и ротора (обычно, как и в нормальных индукционных двигателях, первичной является обмотка статора). Вторичные обмотки 2 и $2'$ включены навстречу друг другу с одинаковым порядком следования фаз, как это имеет место при параллельном включении обычных синхронных машин.

Так как машины I и II идентичны, то вращающиеся потоки Φ_I и Φ_{II} равны и во вторичных обмотках индуктируются э. д. с. E_2' и E_2'' , равные по величине, и, если вторичные обмотки расположены одинаково по отношению к своим первичным обмоткам, то одинаковые и по фазе.

В случае симметричного расположения вторичных обмоток по отношению к первичным (будем называть первые в дальнейшем обмотками ротора) включенные навстречу э. д. с. E_2' и E_2'' уравнивают друг друга, так же, как параллельно включенные и работающие вхолостую трехфазные синхронные генераторы с одинаковым возбуждением. Благодаря указанному обстоятельству во вторичной цепи

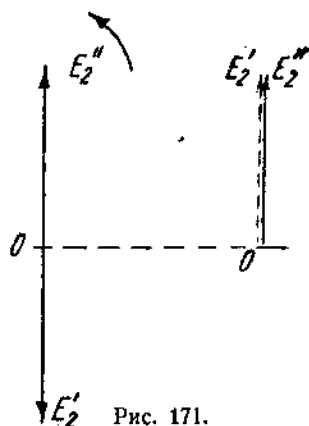


Рис. 171.

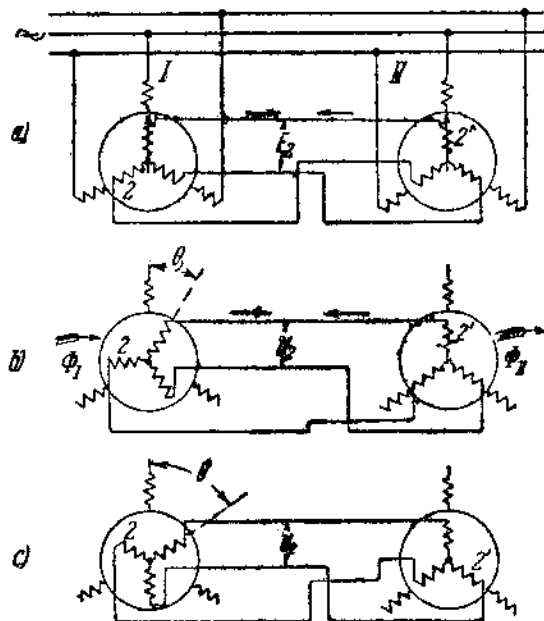
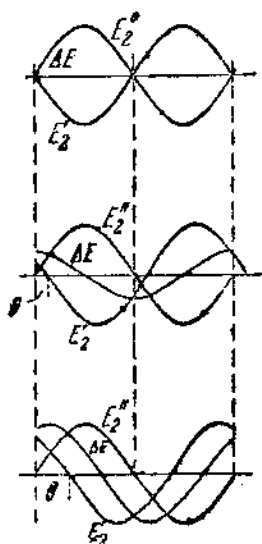


Рис. 172.



обеих машин ток I_2 будет равен нулю, и система окажется в покое. Это положение системы можно также сравнить с параллельным включением двух одинаковых трансформаторов, работающих вхолостую.

Векторная и потенциальная диаграммы э. д. с. одной фазы для этого случая изображены на рис. 171, из которого видно, что эти диаграммы подобны диаграммам холостой работы двух параллельно включенных синхронных машин с одинаковым возбуждением или двух трансформаторов. В статоры машин *I* и *II* в этих условиях поступают лишь токи холостого хода, преимущественно реактивного характера. Указанные токи создают в машинах вращающиеся магнитные потоки Φ_I и Φ_{II} . Взаимное расположение э. д. с. E_2' и E_2'' в синусоидальном их изображении показано на рис. 172, а, на котором представлен частный случай идентичного положения роторов в пространстве, а именно при совпадении осей их обмоток с осями обмоток статоров. Вообще же для получения $I_2 = 0$ обмотки роторов должны занимать относительно статоров обязательно одинаковое положение, но это положение может быть любым.

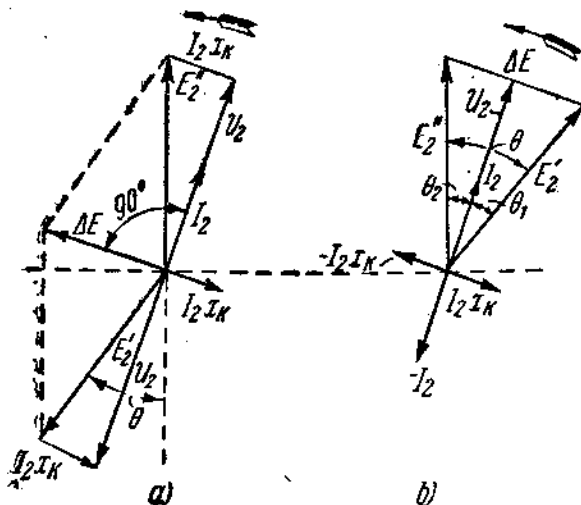


Рис. 173.

Если один из роторов (например *II*) закрепить в указанном выше положении, а другой повернуть на некоторый угол θ , например в сторону вращения поля, и также закрепить в новом положении, то окажется, что э. д. с. E_2' и E_2'' будут сдвинуты по фазе друг относительно друга на угол θ , причем э. д. с. E_2' отстает от э. д. с. E_2'' на угол θ . Это объясняется тем, что после сдвига ротора *I* по направлению вращения поля максимум вращающегося потока будет во времени пересекать обмотку ротора *I* на угол θ позже, чем обмотку ротора *II* (см. рис. 172, б). Векторная и потенциальная диаграммы для этого случая изображены для одной фазы ротора каждой машины на рис. 173. Величина вектора э. д. с. E_2' при сдвиге ротора *I*, благодаря вращающемуся полю, осталась неизменной. Указанный вектор лишь повернулся на угол θ в сторону отставания относительно вектора э. д. с. E_2'' . Благодаря сдвигу по фазе э. д. с. E_2' и E_2'' возникла разность потенциалов ΔE , которая создает в цепи роторов уравнительный ток I_2 , обязанный своим происхождением тому обстоятельству, что э. д. с. E_2' и E_2'' уже полностью больше не уравнивают друг друга. Взаимное расположение синусоид E_2' , E_2'' и ΔE для некоторого сдвига на угол θ изображено на рис. 172, б. Синусоида ΔE получается как результат сложения в каждой данной точке по оси абсцисс ординат синусоид E_2' и E_2'' . Величина тока I_2 определяется величиной ΔE и полным сопротивлением обеих машин z_{KI} и z_{KII} ,

$$I_2 = \frac{\Delta E}{z_{KI} + z_{KII}},$$

где z_{KI} и z_{KII} — сопротивления при коротком замыкании каждой из машин.

В нашем частном случае при равенстве $z_{kI} = z_{kII} = z_k$ (машины по условию одинаковы) выражение для I_2 получит вид:

$$I_2 = \frac{\Delta E}{2z_k}.$$

Очевидно, что половина ΔE будет компенсироваться полным падением напряжения $I_2 z_k$ в одной машине и половина таким же образом в другой машине. В каждой из машин падение напряжения будет иметь место как в роторе, так и в статоре, потому что возникновение тока I_2 во вторичной обмотке обусловит появление тока в первичной цепи.

Если предположить, что активные сопротивления машин равны нулю, то вектор тока I_2 окажется сдвинутым относительно вектора ΔE на 90° в сторону отставания, так как обмотки машины имеют чисто индуктивное сопротивление. Из рис. 173 видно, что в этом случае вектор тока I_2 оказывается почти в фазе с вектором э. д. с. E_2'' и сдвинут почти на 180° относительно э. д. с. E_2' . Это свидетельствует о том, что обмотка ротора II (рис. 173) находится в режиме генератора, т. е. отдает электрическую мощность, а обмотка ротора I работает в режиме двигателя (приемника), т. е. получает электрическую мощность от обмотки ротора II.

Малый сдвиг между э. д. с. E_2' и E_2'' и током I_2 свидетельствует о наличии большой активной составляющей в токе I_2 , т. е. о наличии моментов на валу машин I и II. Действительно, общее выражение для вращающего момента машины имеет вид: $M \equiv I_R \Phi \sin(I_R \Phi)$.

Если пренебречь углом между E_2' и I_2 (сдвиг на 180°), то угол сдвига между Φ и I_2 составит 90° , т. е. в нашем случае $M \equiv I_2 \Phi$.

Таким образом ротор машины I будет испытывать некоторый вращающий момент, равно как и ротор машины II.

Векторная диаграмма на рис. 173, а показывает, что для обмотки 2 (рис. 172, б) машины I имеет место режим двигателя (угол сдвига между E_2' и I_2 больше 90°); наоборот, для обмотки 2' машины II получается режим генератора. Следовательно, энергия передается от обмотки 2' к обмотке 2, т. е. от машины II к машине I.

Наличие генераторного режима во вторичной обмотке 2' машины II обуславливает в ее первичной обмотке 1' режим двигателя, так как указанная машина работает как трансформатор. Полученная обмоткой 2 энергия передается обмотке 1, т. е. машина I работает генератором, отдавая в сеть полученную от обмотки 2 энергию. Вторичная цепь 2—2' схемы I, II по процессам, в ней происходящим, подобна параллельной работе двух синхронных машин, из которых одна (в данном случае машина II) находится в режиме генератора, а вторая в режиме двигателя. Диаграммы, представленные на рис. 173, справедливы и для указанных синхронных машин. Если пренебречь активными сопротивлениями обмоток, то полное падение напряжения в машине от тока I_2 будет равно $I_2 x_k$, причем векторы $I_2 x_k$ в обеих машинах I и II направлены в разные стороны (режимы генератора и двигателя) и уравнивают возникшую разность напряжений ΔE , причем напряжение в линии, соединяющей роторы, окажется равным $\dot{U}_2 = \dot{E}_2' + \dot{I}_2 x_k = \dot{E}_2'' + \dot{I}_2 x_k$ подобно тому, как это имеет место при работе синхронных генератора и двигателя, диаграммами которых являются диаграммы на рис. 173. Первичным двигателем для генератора 2' является обмотка 1', благодаря чему ротор машины II испытывает вра-

щающий момент, направленный в сторону вращения поля машины. Обмотка 2 ротора сама является первичным двигателем для обмотки 1, в силу чего ротор машины I испытывает вращающий момент, направленный в сторону, противоположную вращению поля. Следовательно, если растормозить оба ротора одновременно, то они оба повернутся в противоположных направлениях и остановятся в положении, близком к нулевому, т. е. при $\theta = 0$ (рис. 171), когда моменты, действующие на роторы, исчезнут.

При повороте ротора машины I против поля, она окажется в режиме двигателя, а машина II — в режиме генератора, вследствие чего энергия будет поступать в машину I, передаваться на ротор последней, далее проходить через машину II и отдаваться обратно в сеть за вычетом, конечно, потерь во всех обмотках обеих машин и соединительной линии.

Прохождение энергии в обоих случаях подобно тому, которое имело место при включении двигателя двойного питания на одну сеть по схеме Брюдерлина. Действительно, по существу каждую из машин I и II можно рассматривать как машину двойного питания, включенную в сеть через трансформатор, которым является вторая машина. Если энергия проходит от машины II к машине I, то мощность, передаваемая с ротора на статор машины I, равна мощности P_{II} , поступившей в статор машины II, минус потери в обмотках I', 2' и 2. Мощность же, передаваемая со статора на ротор в машине II, равна мощности P_{II} за вычетом потерь лишь в одной обмотке I'. При протекании энергии в обратном направлении имеют место обратные же соотношения. Таким образом каждая из машин I и II представляет собой машину двойного питания с различными параметрами в цепи ротора и статора (цепью ротора каждой машины надлежит считать обмотку ее ротора плюс трансформатор, которым является для рассматриваемой машины вторая машина). Ранее уже была рассмотрена работа машины с разными параметрами на статоре и роторе, включенная по схеме Брюдерлина (рис. 155 и 156).

Кривая моментов для этого случая представлена на рис. 157. Подобные же по своему характеру кривые имеют место и для каждой из машин в схеме синхронной связи.

Таким образом при повороте одного из роторов на некоторый угол оба ротора будут испытывать момент — один против направления поворота (ведущий), другой — по направлению поворота (ведомый), в силу чего последний ротор будет следовать за ведущим. Оси их окажутся сдвинутыми на некоторый угол θ , достаточный для преодоления тормозящего момента на валу ведомого двигателя. В отношении направления прохождения энергии (от статора к ротору или наоборот) каждая из машин может находиться как в режиме двигателя, так и генератора, что зависит от направления поворота ведущей машины по отношению к направлению вращения поля. Угол сдвига между роторами будет равен $\theta = \theta_1 - \theta_2$, где θ_1 и θ_2 — углы сдвига э. д. с. ротора относительно напряжения. При одинаковых параметрах машин абсолютные значения этих углов равны $\theta_1 = \theta_2$.

Если ротор ведущей машины привести в непрерывное вращение от какого-либо двигателя, то в такое же вращение придет и ротор ведомой машины. В этом случае частоты на статоре и роторе каждой машины окажутся различными и величины моментов и их соотношение соответственно изменяется. Поэтому надлежит различать два случая: работа передачи при скорости, близкой к нулю, и скорости, составляющей некоторую часть от числа оборотов поля машин.

В последнем случае вращение может производиться как по направлению вращения поля, так и против него.

147. Диаграммы системы синхронной связи с индукционными машинами при скорости вращения близкой к нулю. Наиболее простым случаем работы рассматриваемой синхронной передачи является работа при нулевой скорости ведущей машины, т. е. когда ротор последней, медленно и плавно двигаясь, занимает определенные положения, в которых он пребывает неопределенно долго. Как уже отмечалось, в этом случае работа системы аналогична включению Брюдерлина с различными параметрами на статоре и роторе.

Одна из машин в случае схемы синхронной связи, как уже отмечалось, является трансформатором. Если предположить, что в этом трансформаторе $z_k = 0$, намагничивающий ток также равен нулю и коэффициент трансформации $n = 1$, то напряжение на зажимах ротора второй машины окажется постоянным и будет иметь место включение Брюдерлина при одинаковых параметрах статора и ротора. Диаграмма для этого случая представлена на рис. 153. Кривая моментов будет представлять собой близкую к синусоиде кривую, симметричную относительно оси абсцисс (при повороте ротора на одина-

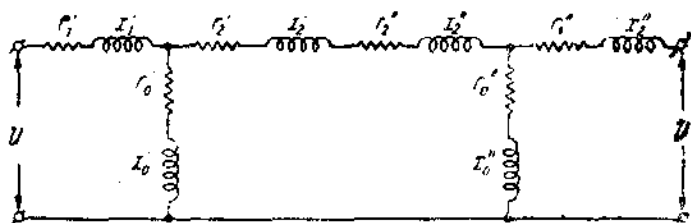


Рис. 174.

ковые углы в обе стороны моменты одинаковы). Подобный случай в схеме синхронной связи может иметь место при мощности ведущей машины во много раз большей, чем мощность ведомой машины. Обычно же на практике мощность первой равна мощности второй в случае одного приемника или же равна сумме мощностей всех ведомых машин параллельно подключенных к ней.

Наиболее характерным является случай работы одной ведущей машины на одну ведомую при равных мощностях обеих машин.

На рис. 174 изображена электрическая схема, эквивалентная схеме синхронной связи с двумя машинами. При рассмотрении этой схемы легко сопоставить включение Брюдерлина и схему синхронной связи. Из рис. 174 видно, что схема представляет собой по существу линию с активными и реактивными сопротивлениями, соединяющую две сети с одинаковыми частотами и одинаковыми напряжениями по величине, но могущими сдвигаться по фазе. При совпадении фаз указанных напряжений в схему поступают с обеих сторон лишь намагничивающие токи, причем в средней части схемы (сопротивление роторов) тока нет. При сдвигании по фазе одного из напряжений по соединительной линии будет передаваться энергия в ту или иную сторону, что зависит от направления сдвигания по фазе. В действительности мы имеем не две сети с двумя равными напряжениями, а одну, причем сдвигание по фазе осуществляется поворотом ротора. При рассмотрении включения Брюдерлина указывалось (рис. 155), что при

включении индукционной машины на две сети с одинаковыми частотами можно поворотом ротора передавать мощность из одной сети в другую. Последнее весьма характерно и для эквивалентной схемы на рис. 174.

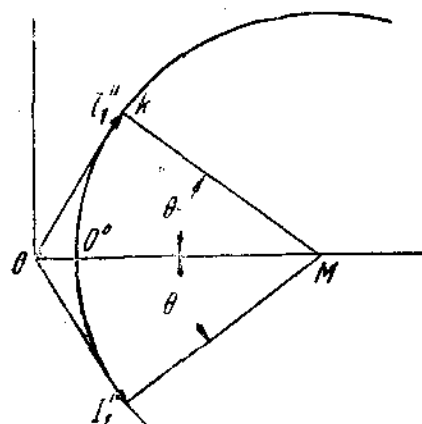


Рис. 175.

общим для обеих машин и центр его будет лежать на оси абсцисс (рис. 175). Действительно, если обратиться к общему выражению для тока статора машины двойного питания от одной сети:

$$I_s = \frac{U(s + \dot{z}_{R_s} \cdot \dot{Y}_s) - U e^{-j(\theta_s - \theta_R)}}{\dot{z}_{R_s} + s \dot{z}_s + \dot{z}_s \cdot \dot{z}_{R_s} \cdot \dot{Y}_s},$$

то получим, что при подстановке вместо $\dot{z}_R$, $\dot{z}_S$ и $\dot{Y}_S$ чисто индуктивных сопротивлений и проводимостей j^x и j^b выражение для I_s будет состоять, как обычно, из двух членов — вектора центра OM и радиуса круга OK , причем вектор центра OM будет представлять собой мнимое количество.

Первичные токи I_1 и I_1'' обеих машин в этом случае являются зеркальным изображением друг друга по отношению к оси мнимых количеств (см. рис. 175). Линия моментов на круге первичных токов совпадает с осью абсцисс, причем сеть доставляет только реактивный ток, в то время как активный ток циркулирует лишь в цепи машин, создавая в одной момент генератора, действующий против поля, а в другой — момент двигателя, действующий по полю. Кривые моментов обеих машин будут одинаковы и симметричны относительно оси абсцисс (синусоиды). В случае наличия активных сопротивлений сеть будет покрывать потери во всех обмотках и поэтому центр круга тока передвинется выше оси абсцисс, так как

Пользуясь эквивалентной схемой, нетрудно применить общие выражения для машин двойного питания, в частном случае — для схемы синхронной связи, причем параметрами ротора каждой машины будут являться суммарные параметры ротора рассматриваемой машины и ротора и статора другой машины.

Представим себе идеальный случай, при котором активные сопротивления статора и ротора обеих одинаковых машин равны нулю, так же, как и активная составляющая тока холостого хода. Тогда передача энергии через схему двух машин будет происходить без каких-либо потерь (см. рис. 174). Круг первичного тока в этом случае окажется

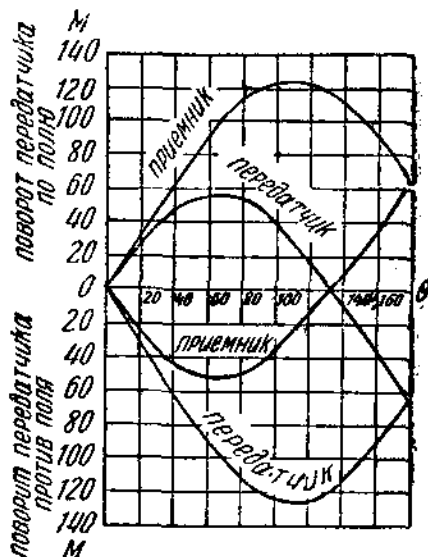


Рис. 176.

поступающая мощность будет больше отдаваемой в сеть на величину потерь (см. рис. 156). Примерные кривые изменения момента в функции от угла θ для одинаковых передатчика и приемника при учете потерь представлены на рис. 176. Верхние кривые показывают изменение моментов передатчика и приемника при повороте передатчика по полю, а нижние — при повороте его против поля. Приведенные кривые подобны кривой на рис. 157 для включения Брюдерлина и могут быть получены из нее сдвижением правой и левой половин кривой путем перегибания влево чертежа по линии 180° . Таким образом, если приемник закреплен, а передатчик повернут по полю, например на 60 электрических градусов, то для выполнения этого поворота к валу передатчика нужно приложить некоторый момент, например, равный 53 килограмм-дециметрам, как это указано на рис. 176 для частного случая. Момент на валу приемника в этом случае будет равен 90 кгдм. При повороте против поля получится обратное соотношение между моментами передатчика и приемника. Очевидно, что значительно выгоднее поворот по полю, при котором на передатчике затрачивается меньший момент вращения при большем рабочем моменте на валу приемника. Диаграмма на рис. 156, как уже указывалось, справедлива и для схемы синхронной связи, причем если двигатели одинаковы, то круги их токов совпадают и рассматриваемая диаграмма может представлять круг первичных токов схемы синхронной связи, на котором при повороте передатчика, например по полю, конец вектора первичного тока передатчика движется по нижней части круга (область генератора), а конец вектора первичного тока приемника движется по верхней части круга (область двигателя). Представленные на рис. 176 кривые моментов соответствуют кривым мощностей при включении Брюдерлина, изображенным на рис. 158, так как угловая скорость магнитного потока является постоянной величиной. При повороте передатчика, например по полю, мощность, передаваемая с его ротора на статор, равна:

$$P_{\psi}' = P - Q_1'' - Q_2'' - Q_2',$$

где P — мощность, поступающая в статор приемника, а Q_1'' , Q_2'' и Q_2' — соответственно потери в обмотках приемника и роторе передатчика. Мощность, передаваемая со статора приемника на ротор, равна $P_{\psi}'' = P - Q_1''$. Очевидно, что

$$P_{\psi}'' > P_{\psi}' \text{ и } M'' = -\frac{P_{\psi}''}{\omega} > M' = \frac{P_{\psi}'}{\omega}.$$

При повороте передатчика против поля будут иметь место обратные соотношения.

Таким образом при повороте передатчика на один и тот же угол θ по полю и против поля приемник будет развивать различные по величине и направлению моменты. Степень их различия по величине определяется величиной потерь в роторах обеих машин

$$\Delta M = M_1'' - M_2'' = \frac{P - Q_1''}{\omega} - \frac{P - Q_1' - Q_2'' - Q_2'}{\omega}.$$

Пологая $Q_1' = Q_1''$, получим:

$$\Delta M = \frac{Q_2' + Q_2''}{\omega}.$$

148. Нарушения синхронного режима работы системы. Неравенство моментов у приемника при сдвигании передатчика по полю и против поля является слабым местом работы схемы синхронной связи на трехфазном токе, в особенности при включении системы в сеть.

Пусть перед включением роторы обеих машин сдвинуты на некоторый угол (например 40 электрических градусов — рис. 176), соответствующий состоянию машин в различных режимах, причем ротор передатчика сдвинут по полю вперед относительно ротора приемника. Таким образом при включении передатчик находится в режиме генератора (момент его по рис. 176 равен $\sim 45 \text{ кгдм}$), а приемник в режиме двигателя (момент равен 60 кгдм). На рис. 157 момент генератора можно найти отсчитав 40° от правого нуля, а момент двигателя — отсчитав 40° от левого нуля.

Если машины при включении не заторможены и не нагружены, то ротор передатчика повернется против поля, а ротор приемника по полю, т. е. навстречу друг друга. Подойдя таким образом к нулевому положению

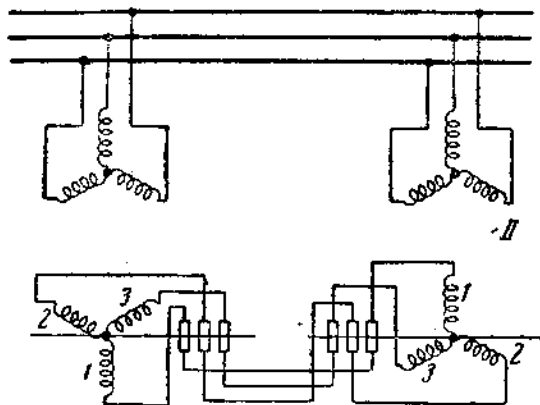


Рис. 177.

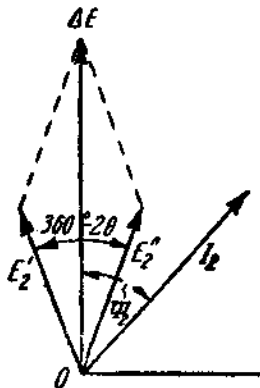


Рис. 178.

(совпадение осей) роторы после небольших качаний, обязанных некоторой живой силой, приобретенной во время поворота, остановятся. В этом и заключается самосинхронизация.

Предположим теперь, что перед включением роторы машин раздвинуты на угол близкий к 180° (рис. 177). Тогда машины окажутся в режиме, близком к короткому замыканию, так как э. д. с. роторов включены не навстречу друг другу, а наоборот, будут, последовательно складываться, как показано на рис. 178. Моменты обоих двигателей в этом случае будут иметь один и тот же знак, соответствующий режиму двигателя (см. рис. 156, 157 и 176), в силу чего оба ротора придут во вращение в сторону вращения поля. Так как вращающие моменты у машин различны, то скорость роторов также будет различна, в силу чего при вращении угол θ будет меняться. Момент упреждающей машины (ротор сдвинут по полю) меньше, чем отстающей, благодаря чему скорость последней будет больше. Кроме того, в области генераторного режима упреждающая машина несколько затормозится (это справедливо и для $s < 1$) и поэтому отстающая ее нагонит. Следовательно, через некоторый период вращения оси обмоток роторов совпадут, ток в цепи последних исчезнет и система остановится.

При сдвиге роторов равно на 180° (рис. 177) оба двигателя будут иметь один момент (на рис. 157 этот момент равен ординате cd) и если валы их совершенно одинаково нагружены, то двигатели начнут вращаться по полю с одинаковой скоростью, сохраняя сдвиг на 180° , как два нормальных асинхронных двигателя. Число оборотов агрегата установится, так же как и в обычном асинхронном двигателе, в соответствии с нагрузкой на валах обеих машин, т. е. последние будут вращаться с некоторым скольжением по отношению к вращающемуся полю. В этих условиях вращение может продолжаться неопределенно долго. Однако практически такой режим редко возможен, так как небольшая разница в нагрузках уже вызовет смещение роторов друг относительно друга, изменение скоростей их и переход в указанный выше затухающий режим. Максимальная разница в нагрузках, при которой возможен такой режим, может быть определена из условия:

$$\Delta M_{\max} = 2 \sin^2 \psi_2 \cdot M^1,$$

а так как при малых скольжениях $\sin \psi_2$ весьма мал, то такой режим устойчивым считать нельзя. Однако и при учете этого следует отметить, что при включении системы возможно расхождение осей на несколько оборотов. Обычно в момент включения системы ротор передатчика бывает заторможен, что несколько способствует быстрому впадению в синхронизм при расположении роторов под некоторым углом, но и тогда нельзя рассчитывать полностью на самосинхронизацию. Пусть, например, роторы перед включением сдвинуты друг относительно друга примерно на 180° . Тогда после включения на оба ротора будут действовать, как уже отмечалось, моменты режима двигателя, причем во вращение по полю придет лишь свободный ротор приемника. При повороте по полю из положения $\theta = 180^\circ$ вектор тока приемника будет скользить по верхней части окружности к положению $\theta = 0$ (рис. 156 и 157). Скорость вращения ротора непрерывно возрастает, достигая своего максимума при прохождении около нулевого положения. Далее, ротор, вследствие запасенной им живой силы, переходит в область генераторного режима (сдвигается по полю относительно неподвижной машины). Запасенная им энергия может (при малом тормозящем моменте) оказаться больше той, которую он отдает в генераторном режиме, благодаря чему он переходит угол $\theta = 180^\circ$ и опять попадает в режим двигателя и т. д. Таким образом приемник в указанных условиях впадает в асинхронный режим двигателя двойного питания при вращении полей в одну сторону, могущий продолжаться сколь угодно долго. Для прекращения вращения надлежит отключить систему от сети или несколько затормозить добавочным моментом вал приемника. Кроме того, если растормозить ротор передатчика, то система, как указывалось выше, также остановится.

Следует отметить, что приведенные выше рассуждения в отношении использования для них кривой рис. 157 справедливы полностью лишь для статического или близкого к нему состояния системы. При вращении же ротора приемника отмеченным образом частота на роторе соответственным образом изменится, а в статоре появится ток почти двойной частоты. Поэтому тормозящее действие генераторного режима снизится и приемник будет работать подобно однофазному асинхронному двигателю (асинхронный режим при вращении полей в одну сто-

¹ Проф. В. С. Кулебакин и инж. А. Н. Ларионов. — Синхронное вращение асинхронных двигателей. Труды ВЭИ, 1926 г., вып. IV, стр. 19—23.

рону — см. § 144). Подобное же явление может иметь место при быстрых рывках ротора передатчика при повороте его против поля, когда вращающий момент приемника мал (см. рис. 176). Если нагрузка на вал приемника по каким-либо причинам при трогании системы против вращения поля больше, чем максимальный вращающий момент приемника (на рис. 157 он равен ординате ef), то при повороте ротора передатчика ротор приемника будет оставаться на месте до тех пор, пока не получит достаточный момент противоположного знака (например момент cd на рис. 157), после чего ротор или начнет вращаться (по полю) в сторону, обратную вращению передатчика, или повернется в обратную сторону до положения, близкого к совпадению осей, т. е. отстанет от ротора передатчика на один оборот (точнее, на 360 электрических градусов). Те же явления (проворачивание или обратное вращение) могут иметь место при упомянутых выше рывках ротора передатчика.

Для предупреждения выпадения приемников из синхронизма, в частности при включении системы в сеть, применяют ряд довольно удачных мер (демпферы, стопоры и т. п.), которые значительно повышают степень надежности работы схем синхронной связи.

В качестве такой меры можно указать на включение в сеть сперва лишь одной фазы передатчика и приемника и затем, после установления синхронизма, включение трехфазного напряжения. Здесь используется ценное качество самосинхронизации систем на однофазном токе, так называемых „Selsyn“ (об этом см. далее).

Асинхронное вращение передатчика и приемника или только последнего при заторможенном первом может получиться также, если будет перепутан порядок следования фаз на статоре или на роторе одной из машин. Если в схеме, например, по фиг. 170 поменять у какой-либо из машин на статоре присоединяемые к сети проводники местами, то поля в машинах будут вращаться в разные стороны, что даст различный порядок следования фаз и на роторе. Поэтому э. д. с. E_2' и E_2'' уже не будут уравновешивать друг друга и оба ротора (при отторможенном передатчике) придут во вращение в противоположные стороны (каждый по полю своего статора). В случае же заторможенного передатчика придет во вращение лишь приемник, а передатчик будет представлять собой трансформатор. Вращение машины объясняется тем, что каждая из машин при таком включении работает в асинхронном режиме двигателя двойного питания при вращении полей в разные стороны, причем друг для друга машины являются трансформаторами, через которые обмотки роторов приключены к сети (об асинхронном режиме двигателя двойного питания при вращении полей в разные стороны см. § 143).

Подобный же режим получается, если при одинаковом порядке следования фаз на статорах перепутать концы обмоток роторов (в этом случае при свободном передатчике обе машины будут вращаться в одну сторону).

Если в схеме по рис. 170 у одной из машин одновременно поменять местами на статоре и роторе какие-нибудь два соединительных проводника, то получится схема синхронной связи с вращением приемника и передатчика в разные стороны, т. е. при повороте передатчика, например, по часовой стрелке приемник будет поворачиваться на этот же угол против часовой стрелки, что объясняется различным направлением вращения полей в машинах (об этой схеме см. подробнее § 151).

В случае работы двухполюсной системы в пределах одного оборота вопрос о выпадении приемника из синхронизма иногда упрощается благодаря стопору, ограничивающему вращение приемника одним оборотом.

Однако и здесь возможно расхождение при включении.

Пусть ротор передатчика заторможен и находится в исходном положении, а ротор приемника сдвинут на 180° по вращению поля. Следовательно, при включении приемник для впадения в синхронизм должен был бы повернуться против поля на 180° , но так как он имеет момент двигателя (см. рис. 157), то он повернется на 180° по полю и упрется в стопор, сдвинувшись на 360° относительно передатчика. Если же последний не закреплен, то при указанных выше условиях (сдвиг приемника по полю на 180°) обе машины начнут вращаться по полю с одинаковой скоростью (см. рис. 157), причем когда приемник упрется в стопор, то угол сдвига между роторами уменьшится, благодаря чему момент приемника, опережающего передатчик, изменит свое направление, и ротор его повернется навстречу ротору передатчика (от стопора), войдя с ним в нулевое положение. При сдвиге на 180° приемника против вращения поля относительно передатчика (может иметь место, если вращение из исходного положения осуществляется против поля) ротор передатчика окажется упреждающим, и ротор приемника повернется к исходному положению.

Очевидно, что если сдвиг оказывается более 180° , то расхождение при включении получится на целый оборот (роторы расположатся по обе стороны стопора). Соответственным поворотом ротора передатчика после включения на один оборот можно произвести согласование машин системы.

Работа системы в пределах одного оборота может иметь место там, где между исполнительным механизмом и приемником нет передачи (редуктора скорости), а имеется непосредственная связь (передача приказаний, сигналов и т. п.).

149. Диаграммы системы синхронной связи с индукционными машинами при скорости вращения отличной от нуля. Кроме передачи на расстоянии угла поворота рассматриваемая система синхронной связи применяется для передачи синхронного вращения, т. е. для приведения управляемой детали со скоростью синхронной с управляющим валом. Подобного рода передача нашла весьма широкое применение в целом ряде различных отраслей промышленности (в звуковом кино для синхронного вращения лентопротяжных механизмов звукозаписывающего и съемочного аппаратов, в печатном деле, на бумажных фабриках и т. п.).

Схема синхронной передачи в этом случае изображена на рис. 179. Здесь для привода передатчика *I* служит первичный двигатель *Д* с широкой регулировкой скорости (например двигатель постоянного тока) или без нее. Вращение может производиться в одну или обе стороны (по полю или против поля), что зависит от характера привода.

Синхронно с передатчиком вращается один или несколько приемников *П*, связанных с исполнительным механизмом при помощи передачи или непо-

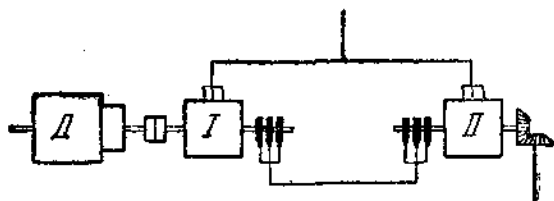


Рис. 179.

средственно. Подобную синхронную передачу можно назвать электрическим валом, заменяющим собой прямое механическое соединение. Угол сдвига фаз передатчика относительно приемника можно сравнить с углом скручивания длинного механического вала.

Пусть система, подобная изображенной на рис. 179, вращается с некоторой скоростью, величину которой, как и ранее при рассмотрении двигателя двойного питания, мы будем определять через скольжение по отношению вращающихся полей статоров машины.

Общие выражения для токов машины двойного питания в частном случае схемы синхронной связи двух одинаковых машин могут быть представлены в несколько ином виде, чем это имело место выше.

Выразим величины первичных токов системы через приложенное напряжение, активное сопротивление, коэффициенты самоиндукции первичной и вторичной обмоток L_1 и L_2 взаимной индукции M и коэффициент рассеяния машины σ .

Будем считать, что значок „'“ принадлежит, считая по направлению вращения поля, упреждающей машине (находящейся в режиме генератора), а значок „"“ отстающей машине (вернее находящейся в режиме двигателя). Например, при вращении по полю первый значок принадлежит передатчику, а второй — приемнику. В случае вращения против поля значки меняются местами.

Для цепи статора упреждающей машины можем написать следующее общее уравнение э. д. с.:

$$U - I_1' (r_1 + j\omega L_1) - j\omega M_{21} I_2 = 0. \quad (167)$$

Таким же образом для цепи статора отстающей машины имеем (параметры машин одинаковы):

$$U - I_1'' (r_1 + j\omega L_1) - j\omega M_{21} I_2 e^{-j\theta} = 0.$$

Для цепи роторов при скольжении s напишем:

$$2I_2 (r_2 + j\omega L_2 s) + j\omega M_{12} s \cdot I_1' - j\omega M_{12} s I_1'' e^{+j\theta} = 0. \quad (168)$$

Под r_2 надо понимать активное сопротивление фазы, включая сопротивление соединительных проводов.

Принимая во внимание, что

$$M_{21} = M_{12}; \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

и полагая

$$\frac{r_1}{\omega L_1} = \epsilon_1 \quad \text{и} \quad \frac{r_2}{\omega L_2} = \epsilon_2;$$

из совместного решения написанных выше выражений в отношении I_1' и I_1'' окончательно получим следующие значения:

$$I_1' = \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 + j\epsilon_2 - \left(\frac{1+\sigma}{2} - \frac{1-\sigma}{2} \cos \theta \right) s + j \left(\epsilon_1 + \frac{1-\sigma}{2} \sin \theta \right) s}{(\epsilon_1^2 - 1) \epsilon_2 + j 2 \epsilon_1 \epsilon_2 - \epsilon_1 (1+\sigma) s + j (\epsilon_1^2 - \sigma) s}; \quad (169)$$

$$I_1'' = \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{-\epsilon_2 + j\epsilon_2 - \left(\frac{1+\sigma}{2} - \frac{1-\sigma}{2} \cos \theta \right) s + j \left(\epsilon_1 - \frac{1-\sigma}{2} \sin \theta \right) s}{(\epsilon_1^2 - 1) \epsilon_2 + j 2 \epsilon_1 \epsilon_2 - \epsilon_1 (1+\sigma) s + j (\epsilon_1^2 - \sigma) s}. \quad (170)$$

¹ См. В. Ф. Миткевич — Теория перемешных токов, 1931 г., стр. 199.

Приняв во внимание, что $\cos \theta \pm j \sin \theta = e^{\pm j\theta}$, можем полученные выражения сравнить с общими выражениями для токов I_S и I_R двигателя двойного питания, приведенными, например, в § 138 для включения Брюдерлина при $s = 1$.

Из сопоставления этих выражений видим, что они по существу представляют собой одно и то же и являются уравнениями окружности. Токи I_S и I_R в данном случае представляют собой токи I_1' и I_1'' , причем, благодаря принятым нами условиям относительно значков „ $'$ “ и „ $''$ “: $I_1' = I_S$ и $I_1'' = I_R$ и, наоборот (зависит от направления поворота ротора). Можно сказать, что двигатель двойного питания и схема синхронной связи отличаются друг от друга тем, что первый имеет только две трансформаторно связанные обмотки, обе присоединенные к сети, а вторая, кроме этих обмоток, трансформаторно разобщенных, имеет еще трансформаторно связанное с ними звено из двух электрически соединенных между собой обмоток роторов. Оба вектора I_1' и I_1'' скользят по одной окружности и отличаются друг от друга операторами поворота (соответственно $e^{+j\theta}$ и $e^{-j\theta}$).

Если пренебречь активными сопротивлениями статора и ротора r_1 и r_2 , то $\epsilon_1 = 0$ и $\epsilon_2 = 0$ и тогда выражения для I_1' и I_1'' можем представить в следующем виде:

$$I_1' = -j \frac{U}{\omega L_1} - j \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{1-\sigma}{2\sigma} (1 - e^{+j\theta}); \quad (171)$$

$$I_1'' = -j \frac{U}{\omega L_1} - j \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{1-\sigma}{2\sigma} (1 - e^{j\theta}). \quad (172)$$

Вектор центра окружности токов равен:

$$\vec{OM} = -j \frac{U}{\omega L_1} - j \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{1-\sigma}{2\sigma} = -j \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{1+\sigma}{2\sigma}. \quad (173)$$

Из последнего выражения видно, что центр окружности лежит на оси мнимых количеств. Таким образом мы получим тот же результат, что и в случае применения общих выражений для двигателя двойного питания (рис. 175) при $r_1 = 0$ и $r_2 = 0$. Отрезок $O-O^0$ на диаграмме рис. 175 равен $-j \frac{U}{\omega L_1}$ и представляет собой реактивную составляющую тока холостого хода машины, а величина $M_k = \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{1-\sigma}{2\sigma}$ — радиус окружности. Из

выражений для I_1' и I_1'' видно, что в случае $r_1 = 0$ и $r_2 = 0$ они не зависят от величины скольжения s . Таким образом для всех значений s при этих условиях будет служить для векторов I_1' и I_1'' один и тот же круг, центр которого лежит на оси мнимых количеств.

Пренебрежем теперь только активным сопротивлением r_1 ($\epsilon_1 = 0$) статоров машин. Тогда из общих выражений (169), (170) для I_1' и I_1'' можем получить уравнения в следующем виде:

$$I_1' = -j \frac{U}{\omega L_1} + \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{\frac{1-\sigma}{2}s}{\sqrt{\frac{r_2^2}{(\omega L_2)^2} + \sigma^2 s^2}} e^{-j \arctg \frac{\omega L_2 \sigma s}{r_2}} (1 - e^{j\theta}). \quad (174)$$

Для I_1'' имеет место то же выражение, но с оператором поворота $e^{-j\theta}$. Из последнего выражения видно, что положение центра круга зависит от величины скольжения.

ординат, то сторона этого угла пересечет окружность M' в точке M , являющейся центром круга I_1' и I_1'' для данного скольжения.

Следует отметить, что $\frac{\omega L_2 s}{r_2} = \frac{x_2}{r_2}$, где x_2 — реактивное сопротивление от потоков рассеяния обмотки ротора.

На рис. 182 представлена круговая диаграмма для $s = 0,5$ и показаны векторы токов I_1' и I_1'' при угле $\theta = \alpha = \arctg \frac{\omega L_2 s}{r_2}$. Диаграмма

первичных токов для $s = 1$ будет иметь вид (при $r_1 = 0$), изображенный на рис. 183, из которого видно, что при разведении роторов на 180° векторы I_1' и I_1'' попадают одновременно на точку окружности Гейланда, соответствующую короткому замыканию отдельных одинаковых двигателей, составляющих схему

синхронного поворота. При других скольжениях и при $\theta = 180^\circ$ концов векторов тока также оказывается на окружности Гейланда, построенной

для работы отдельного двигателя. Это объясняется тем, что при угле $\theta = 180^\circ$ обе машины работают в режиме двигателя (по существу независимо друг от друга) при данном скольжении как нормальные асинхронные двигатели, вращаясь в одну сторону (по полю). Вторичные э. д. с. их складываются, а ток имеет значение:

$$I_2 = \frac{2E}{2z_2} = \frac{E_0}{z_2},$$

т. е. так же, как и в обычном двигателе. Приведенные рассуждения являются теоретическими, так как практически подобный режим весьма неустойчив, требуя почти абсолютно одинаковых нагрузок на валы двигателей. (О подобном режиме уже упоминалось в § 148 при рассмотрении нарушений синхронного режима.)

При скольжении $s = 0$ диаметр круга токов оказывается равным нулю, так как при синхронном вращении в сторону вращения поля линии последнего не пересекают проводников ротора и в его обмотке э. д. с. и

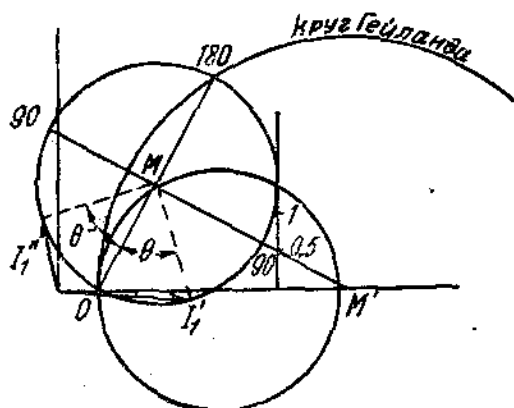


Рис. 182.

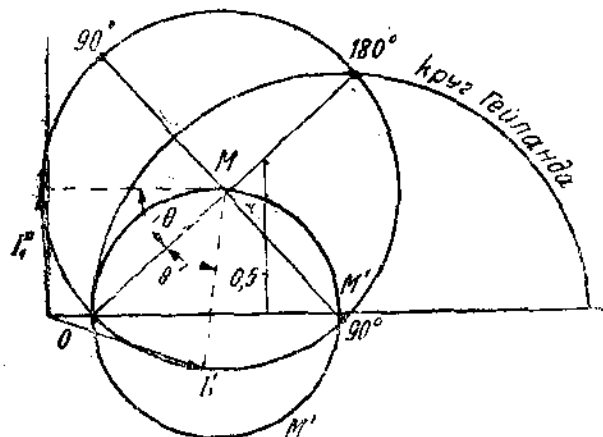


Рис. 183.

ток равен нулю. Следовательно, система не развивает никакого момента, и в статоры поступает лишь ток холостого хода. Наконец, при $s = \infty$ круг токов совпадает с кругом токов при $r_2 = 0$. (Напомним, что, кроме того, в основу всех диаграмм на рис. 180, 181, 182 и 183 положено, что $r_1 = 0$). Такое совпадение кругов естественно, так как при $s = \infty$ реактивное сопротивление бесконечно велико по сравнению с активным, благодаря чему последним можно пренебречь.

Сравним полученные диаграммы работы системы при изменяющемся скольжении с подобными же диаграммами, которые были получены при рассмотрении работы двигателя двойного питания в общем виде.

На рис. 164 изображен круг K , представляющий собой геометрическое место центров кругов тока статора машины двойного питания при меняющейся частоте, подобно тому как это получено на рис. 181 для индукционных машин в схеме синхронной связи. Разница между этими двумя диаграммами заключается прежде всего в том, что круг K на рис. 164 совпадает с кругом первичного тока этой же машины при работе ее в режиме нормального асинхронного двигателя. Круг же M' на рис. 181 имеет диаметр, равный лишь половине диаметра круга тока каждой машины при работе ее отдельно в режиме обычного асинхронного двигателя.

Во втором случае круг M' соответствует асинхронному режиму при каскадном соединении двух асинхронных машин, входящих в систему синхронной связи (действительное каскадное соединение этих машин имело бы на диаграмме вдвое больший намагничивающий ток, так как при каскаде он поступает в систему с одной стороны, а при синхронном повороте тот же общий ток делится на два статора). Таким образом наличие двух дополнительных обмоток в схеме синхронной связи, по сравнению с машиной двойного питания, делает диаметр круга M' вдвое меньше, чем диаметр круга K на рис. 164. Диаграмма на последнем рисунке построена для постоянного вторичного (роторного) напряжения $U_R = \text{const}$, тогда как на диаграмме по рис. 181 вторичное напряжение меняется пропорционально частоте на роторе и его скольжению. Это обстоятельство обусловило противоположные результаты в отношении диаметров кругов тока при различных скольжениях.

В диаграмме по рис. 164 при $s = 0$ диаметр круга тока получается наибольшим (в пределах скольжения от $s = 0$ до $s = +\infty$), а при $s = \infty$ равен нулю. Так как напряжение U_R неизменно, то при $s = 0$ и $f_R = 0$ машина возбуждается постоянным током ($x_R = 0$) и работает в режиме нормального синхронного двигателя. Наоборот, при $s = \infty$ $x_R = \infty$ ток оказывается равным нулю, так как неизменной величиной U_R в этом случае можно пренебречь. Обратные соотношения имеют место в диаграмме на рис. 181 (здесь при $s = 0$ $E_2 = 0$, а при $s = \infty$ $E_2 = \infty$, так же как и x_2 , в то время как $r_2 \approx 0$).

Следует отметить, что если положить в обеих машинах $r_2 = 0$, а $r_1 \neq 0$, то мы приходим к машине двойного питания в схеме Брюдерлина.

Пользуясь выражениями (169), (170) для I_1' и I_1'' можно также построить диаграммы для вполне реального случая при $r_1 \neq 0$ и $r_2 \neq 0$ (большого отличия от приведенных на рис. 180—183 они не составляют).

150. Кривые моментов системы синхронной связи с индукционными машинами при скорости вращения отличной от нуля. Из рассмотрения диаграмм рис. 180—183 видно, что при уменьшении скольжения (вращение по полю) круг токов I_1' и I_1'' уменьшается и при $s = 0$

превращается в точку. Соответственно с этим уменьшается и максимальный вращающий момент передатчика и приемника и при $s=0$ становится также равным нулю. К подобным же выводам можно прийти и из рассмотрения векторных диаграмм э. д. с. роторов (рис. 173). При уменьшении скольжения будут соответственно уменьшаться э. д. с. E_2 в обмотке ротора и поэтому окажется уменьшенной и разность напряжений ΔE . На рис. 184 представлены потенциальные диаграммы э. д. с. роторов для $s=1$ и $s<1$. Во втором случае $\Delta E_{s \max} < \Delta E_{\max}$. Благодаря этому оказывается меньше возможный максимальный уравнивающий ток, так как хотя x_2 уменьшается пропорционально скольжению, но r_2 остается примерно неизменным, следовательно z_{2s} убывает менее интенсивно, чем E_{2s} и $\Delta E_{s \max}$. Кроме того, благодаря уменьшению x_2 уменьшается угол сдвига между ΔE_s и I_{2s} . При построении диаграммы на рис. 184 при $s=1$ считалось, что $x_2 \gg r_2$ и поэтому вектор тока I_2 был направлен примерно под углом в 90° к ΔE .

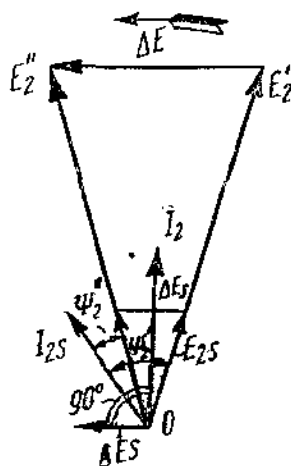


Рис. 184.

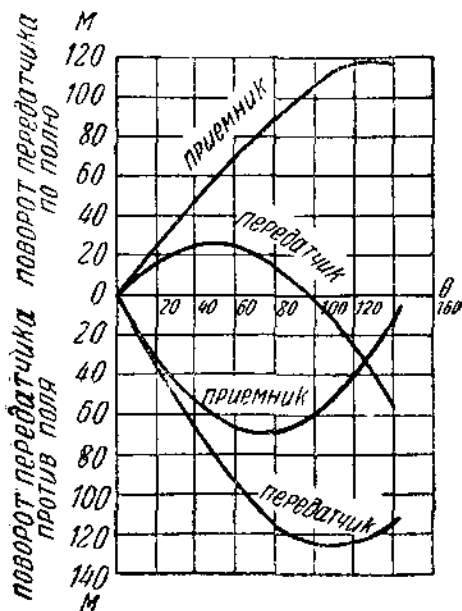


Рис. 185.

и вместе с тем почти совпадал по фазе с э. д. с. E_2'' и E_2' . При $s<1$ угол сдвига между I_{2s} и ΔE_s уменьшился, а между I_2 и E_{2s}'' и E_{2s}' возрос, что также уменьшило синхронизирующие моменты машин. В особенности сильно возрос угол между I_{2s} и э. д. с. E_{2s}' передатчика, идущего по полю вперед приемника. При уменьшении s вектор I_{2s} поворачивается справа налево. Поэтому максимальный момент первого при уменьшении скольжения убывает более интенсивно, чем максимальный момент второго. На рис. 185 представлены экспериментальные кривые моментов при $s=0,5$ и $s=1,5$ для той же системы, что и на рис. 176. Из сравнения кривых обоих рисунков видно, что при вращении по полю максимальный момент передатчика при $s=0,5$ уменьшится примерно вдвое по сравнению с моментом при $s=1$. Убывание максимального момента приемника значительно медленнее.

При вращении против поля, наоборот, происходит нарастание максимальных моментов передатчика и приемника. Потенциальная диаграмма для

этого случая изображена на рис. 186. Здесь отстающей э. д. с. является э. д. с. приемника. Вектор тока I_2 при $s=1$ и повороте системы против поля составляет с э. д. с. передатчика меньший угол, чем с э. д. с. приемника. При увеличении оборотов против поля z_{2s} благодаря наличию r_2 растет несколько медленнее, чем E_{2s} и ΔE_s , в силу чего ток I_{2s} несколько увеличивается (при том же угле θ). Кроме того, вектор I_{2s} сдвигается (по чертежу слева направо) относительно ΔE_s на больший угол (достигающий в пределе 90°) вследствие увеличения x_2 по сравнению с r_2 .

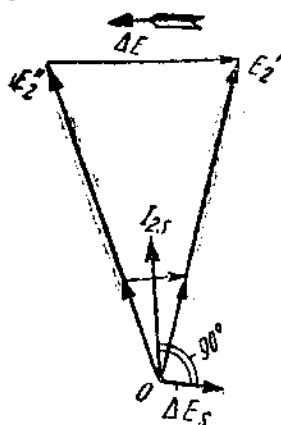


Рис. 186.

На рис. 187 представлены экспериментальные кривые максимальных моментов в зависимости от скольжения для той же системы, что и на рис. 185. При вращении против поля момент приемника изменяется (возрастает) с увеличением скольжения довольно интенсивно, тогда как момент передатчика почти не изменяется. При вращении по полю имеют место обратные соотношения. (Вообще можно сказать, что интенсивнее изменяются моменты в той машине, в которой I_{2s} и E_{2s} составляют больший угол, так как в этом случае при изменении угла ψ_2 резко меняется $\cos \psi_2$, а след. P).

Приведенные на рис. 187 кривые показывают тот максимальный момент, который может развить каждая из двух машин при любом направлении вращения с любой скоростью в обычных пределах рабочих скоростей ($s=0,5 \div 2$). Следует отметить, что указанные кривые не учитывают разницы в угле смещения θ . Так, например, на рис. 185 максимальные

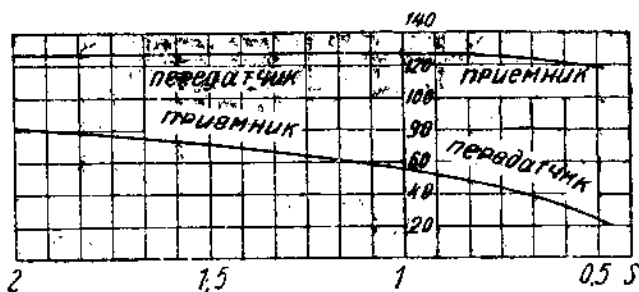


Рис. 187.

моменты при вращении по полю соответственно для передатчика и приемника наступают при разных значениях угла θ (в 50° и 130°).

Проблемы эксплуатации систем синхронной передачи несколько отличны от вопросов эксплуатации обычных асинхронных двигателей, так как в первом случае скорости могут меняться плавно от нуля. Поэтому система синхронной передачи должна в основном определяться величинами моментов, а не мощностью. При наличии кривых подобных показанным на рис. 185 и 187 нетрудно выбрать мощность машины, развивающей достаточный момент при данной скорости.

Из рис. 185 видно, что если угол θ для данной машины при $s = 0,5$ перейдет за 90° , то момент передатчика начнет уменьшаться и приблизительно при 98° изменит свой знак. Это свидетельствует о том, что передатчик переходит в режим двигателя и будет подгонять приводной двигатель системы, причем приемник в этих условиях работает еще на устойчивой части кривой моментов, так как тормозящий момент, раздвигающий роторы машин на угол $\theta \approx 100^\circ$, меньше максимального момента приемника при данной скорости. Снижение момента передатчика и, затем, изменение его знака может вызвать увеличение скорости приводного двигателя, а следовательно, и всей системы, благодаря чему отрицательный момент передатчика возрастет, а приемника снизится (система перейдет с характеристик по рис. 185 на другие характеристики при уменьшенном против первоначального скольжении). В результате этого машины могут выпасть из синхронизма и перейти в асинхронный режим. Таким образом хотя вообще и возможно работать (при устойчивой скорости приводного двигателя) с углом θ больше угла, соответствующего максимальному моменту передатчика, но шансов на устойчивую работу значительно меньше, чем при углах θ , меньших указанного угла.

Поэтому в большинстве случаев при работе в направлении вращения поля для получения достаточного максимального момента как приемника, так и передатчика следует ограничиваться скоростью, примерно равной половине синхронной скорости вращающегося поля.

Для практического выбора машин в системе синхронного поворота надлежит иметь расчетную зависимость, позволяющую сопоставить максимальный момент машины в системе в зависимости от параметров этой машины при данном скольжении с максимальным моментом, имеющим место при работе ее обычным асинхронным двигателем.

Пренебрежем, как и ранее, активными сопротивлениями r_1 обмоток статоров обеих машин.

В этом случае перпендикуляры, опущенные из отдельных точек круга токов на ось абсцисс, будут пропорциональны вращающим моментам машин. Максимальный момент приемника при вращении системы по полю при некотором скольжении s имеет величину $M_{ak}'' = C(h + H)$, где C — постоянный коэффициент (см. рис. 188, на котором представлена диаграмма машин системы при $1 > s > 0$; здесь окружность M' — геометрическое место центров кругов тока при различных s). Выразив отрезки h и H через r — радиус круга Гейланда для отдельной машины, и угол

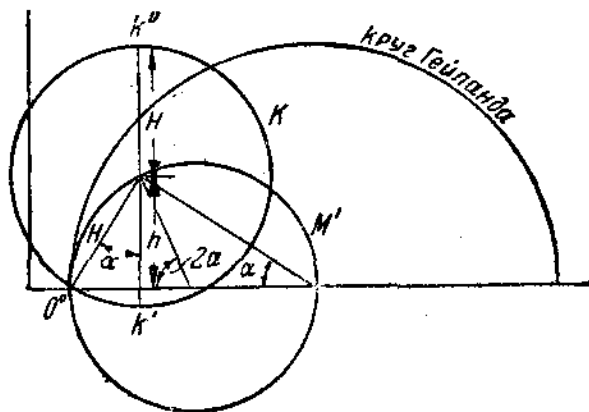


Рис. 188

$$\alpha = \frac{\omega L_2 s}{r_2} = \frac{x_2 s}{r_2},$$

получим

$$M''_{dk} = Cr \sin \alpha (1 + \cos \alpha).$$

Максимальный момент отдельной машины при работе ее в режиме асинхронного двигателя

$$M_{dkn} = Cr.$$

Отношение этих моментов будет иметь вид:

$$\frac{M''_{dk}}{M_{dkn}} = \sin \alpha (1 + \cos \alpha).$$

Изменение этого отношения в функции от угла α показано на рис. 189, из которого видно, что наибольший возможный максимальный момент

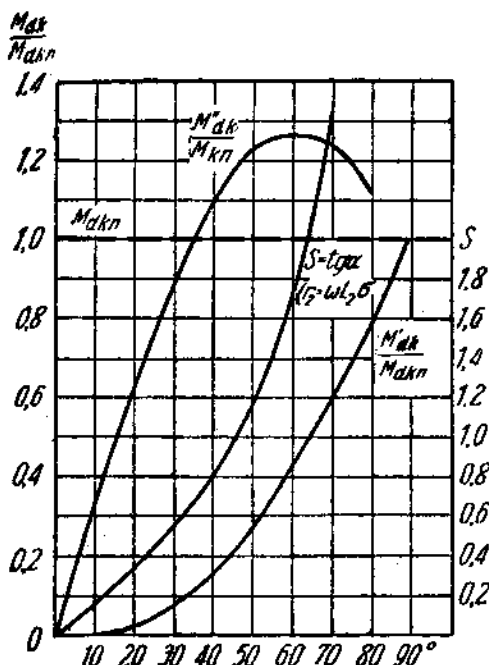


Рис. 189.

приемника при вращении по полю примерно на 30% больше, чем максимальный момент машины, работающей в режиме нормального асинхронного двигателя (подробнее см. ниже). Угол расхождения роторов системы при наступлении максимального момента в приемнике при любом скольжении равен, как это видно из рис. 188, $\theta_k = (180^\circ - \alpha)$. Наибольший максимальный момент приемника соответствует по рис. 189 углу $\alpha = 60^\circ$. Следовательно, в этом случае $\theta_k = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$. Скольжение при этом может быть вычислено из соотношения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L_2 s s}{r_2};$$

в данном случае:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{3}.$$

Если желательно иметь максимальный момент на приемнике близким к максимальному моменту отдельного двигателя, то угол α не должен быть менее $25 \div 30^\circ$, что соответствует $\operatorname{tg} \alpha \approx 0,5$. Это позволяет для соблюдения равенства $M''_{dk} = M_{dkn}$, т. е. получения хорошей работы системы, написать следующее условие:

$$\frac{\omega L_2 s s}{r_2} \geq 0,5.$$

Если принять во внимание сопротивление щеток, переходных контактов и соединительных проводов, а также в большинстве случаев сравнительно небольшую мощность применяемых в синхронной передаче машин, то можно считать, что $r_2 \approx x_2 = \omega L_{20}$. Тогда приведенное выше условие показывает, что скольжение не должно быть меньше 0,5, если желательно соблюдение примерного равенства $M''_{dk} = M_{dkn}$ (к этому же выводу мы пришли выше

по другим соображениям). При вращении системы против поля момент приемника получается меньше момента передатчика, так как по отношению к вращающемуся полю ротор приемника отстает на угол θ от ротора передатчика (пространственно он отстает от последнего на тот же угол θ). Благодаря этому вектор тока приемника движется по нижней части круга токов, и моменты, как уже отмечалось выше, получаются меньше (рис. 185 и 187).

В этом случае $M'_{dk} = C(H - k)$ и соотношение между максимальным моментом приемника M'_{dk} и максимальным моментом M_{dhn} отдельного двигателя имеет вид:

$$\frac{M'_{dk}}{M_{dhn}} = \sin \alpha (1 - \cos \alpha).$$

Угол θ_k , соответствующий максимальному моменту приемника при вращении системы против поля, равен, как это видно из рис. 188, углу α (вектор тока приемника проходит дугу $0^\circ k'$ по кругу K при наступлении максимального момента).

Зависимость $\frac{M'_{dk}}{M_{dhn}} = f(\alpha)$ дана также на рис. 189.

Полученные на последнем рисунке кривые дают зависимость максимальных моментов как от скольжения при данных параметрах, так и от отношения последних при данном скольжении. Если положить скольжение постоянным, а сделать переменным величину $\omega L_2 \sigma$ или r_2 , то видно, что выгодно иметь возможно малые значения для r_2 и большие значения x_2 , что подтверждается и рассмотрением потенциальных диаграмм на рис. 184 и 187. Кроме того, при $s = 1$ для получения, например, $0,2 M_{dhn}$ при повороте по полю можно допустить значительно большее активное сопротивление, чем при повороте против поля.

Действительные соотношения ($r_1 \neq 0$) получают вообще несколько более благоприятными, так как значение момента упреждающей по полю машины повышается за счет передаваемых во второй машине с ротора на статор потерь в меди (линия моментов на круговой диаграмме соответственно поднимется над осью абсцисс). В основном же соотношения остаются подобными приведенным на рис. 189.

На последнем рисунке также представлено соотношение между величиной s и углом α при $r_2 = \omega L_2 \sigma$.

При вращении системы против поля максимальный момент приемника достигает значения, равного M_{dhn} , лишь при $\alpha = 90^\circ$, что соответствует $r_2 = 0$ или при $r_2 \neq 0$ скольжению, равному бесконечности.

Таким образом, если вращение передается лишь в одну сторону, то вообще более выгодно работать в направлении вращения поля, так как это обеспечивает более высокий момент приемника, меньшую мощность приводного двигателя и меньшие потери в системе (вследствие уменьшенной частоты на роторе). Однако скорость передачи при этом оказывается ограниченной примерно до $s = 0,5$, тогда как при вращении против поля имеют место весьма широкие пределы скорости.

Кроме того, существенную роль при выборе вращения может играть вопрос о скорости остановки приводного механизма. Если приемник приводит нагрузку, имеющую значительную инерцию, причем необходима быстрая фиксированная остановка, то при резком затормаживании направление сдвига между роторами, благодаря инерции приемника и его нагрузки, меняется

и последний становится передатчиком, сдвигаясь механически вперед. При вращении по полю момент передатчика сравнительно мал и поэтому при быстрой остановке приемник повернется по полю и, сделавшись передатчиком, может быть не заторможен указанным моментом, что повлечет за собой выпадение из синхронизма. В случае же остановки после вращения против поля ротор приемника, по инерции повернувшись против поля, окажется под воздействием большого тормозящего момента.

Для системы, работающей продолжительно, необходимо определять размеры машины по нормальному рабочему моменту, сообразуя с ним тепло-

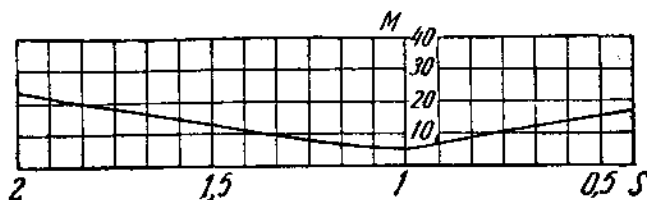


Рис. 190.

вой баланс машин. Указанный рабочий момент, конечно, как и во всякой машине, должен быть значительно меньше максимального (отношение их обычно составляет $\lambda = 2 \div 2,5$).

В отношении нагрева для одной и той же машины при различных s могут быть допущены различные моменты для продолжительной работы системы.

На рис. 190 приведена типичная кривая рабочих моментов приемника при различных скоростях (для той же системы, что и на рис. 187 и 185). По мере уменьшения скорости передачи интенсивность вентиляции уменьшается и поэтому должен быть допущен меньший рабочий момент во избежание перегрева машины. При данной скорости рабочий момент при вращении против поля оказывается несколько меньше рабочего момента, допустимого при вращении по полю, что объясняется большими потерями в роторе за счет повышенной частоты в нем при вращении против

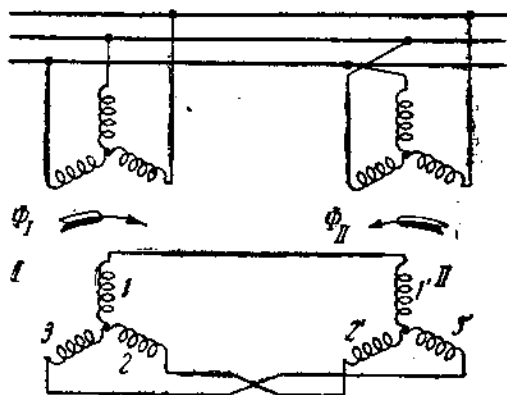


Рис. 191.

поля. Очевидно, что в случае применения системы для вращения в обе стороны надлежит рассчитывать машины на последний менее благоприятный случай: при работе же в одну сторону выбор направления вращения зависит от конкретных условий предполагаемого режима работы. Так, при малых скоростях и плавных остановках следует выбрать вращение по полю и наоборот — при больших скоростях и резких остановках надлежит предпочесть вращение против поля.

151. Отдельные схемы и примеры применения систем синхронной связи с трехфазными индукционными машинами. В некоторых случаях может встретиться необходимость во вращении приемника в сторону, противоположную вращению передатчика при сохранении синхронности работы. Такую схему возможно осуществить путем изме-

нения направления вращения потока в одной из машин при одновременном перекрещивании проводов и в линии роторов, т. е. изменении порядка следования фаз в одном из роторов при соединении его с другим (рис. 191). При покое системы, благодаря перемене концов на роторе, потенциалы отдельных фаз обоих роторов будут в каждый момент равны и противоположны. Если повернуть передатчик I по полю, то, чтобы, например, э. д. с. фазы I' приемника была равна и противоположна э. д. с. фазы I передатчика, ротор приемника также должен повернуться по полю на тот же угол, т. е. в сторону, противоположную повороту ротора передатчика.

Если величина момента не играет существенной роли, то могут быть применены машины с трехфазным статором и однофазным ротором, что позволяет свести число соединительных проводов к двум (рис. 192). Следует отметить, что момент такой системы (подобно асинхронному двигателю с однофазным ротором) будет понижен за счет наличия на роторе однофазного потока и всего одной фазы из трех, применяемых в обычном соединении с трехфазными роторами.

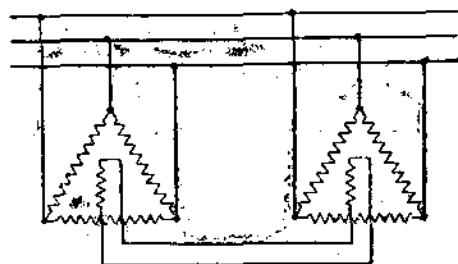


Рис. 192.

Довольно часто применяется система (рис. 193), между приемником и передатчиком которой включена дополнительная машина D , представляющая собой электрический дифференциал и выполненная так же, как и другие машины системы.

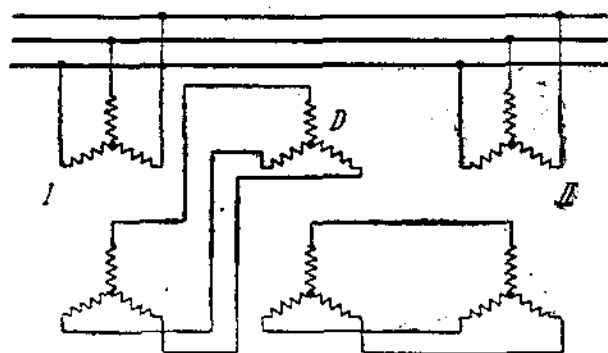


Рис. 193.

Машина D жестко закреплена, а машина II работает приемником. В этом случае машина D является простым трансформатором, и схема работает обычным образом: при повороте ротора передатчика соответственно поворачивается ротор приемника. Если после такого поворота повернуть также ротор дифференциала D , то ротор приемника сместится на алгебраическую сумму перемещений машины I и D . Действительно, изменение фазы э. д. с. в статоре машины при повороте ротора машины I вызывает соответствующее смещение по фазе э. д. с. ротора машины D , а следовательно, поворот ротора приемника. Кроме того, самый поворот ротора машины D опять-таки вызывает смещение в ту или иную сторону ротора машины II . Систему такого рода можно применять в весьма большом числе соединений, передающих и

Наличие последней дает устройство для привода принимающего прибора от двух отдельных постов по желанию отдельно от каждого или от того и другого одновременно. Пусть машина I служит передатчиком, маши-

принимаящих приборов, что позволяет производить алтебранческое суммирование приказаний целого ряда командных постов.

В качестве приемника от двух передатчиков может служить и дифференциал D , ротор которого суммирует перемещения обоих передатчиков. Дифференциал D применяется для поддержания примерно одинакового числа оборотов двух валов, несущих индукционные передатчики, включенные по схеме 193. При расхождении оборотов машин I и II дифференциал D начинает вращаться за счет разности числа оборотов этих машин и производит соответственное регулирование.

Следует отметить, что, так как машина D не присоединена к сети, то намагничивающий ток доставляют ей машины I и II .

Как на одно из применений системы с дифференциалом можно указать на установку синхронной связи в каландре при бумагоделательной машине. Бумага, проходя через каландр, должна наматываться на валик в рулоны. Скорость прохождения бумаги через каландр регулируется, причем скорость вращения валика должна находиться в строгом соответствии с меняющейся скоростью работы каландра, с тем чтобы натяжение бумаги между последним и накатным аппаратом было ровным и не чрезмерно большим, но вместе с тем, чтобы оно давало достаточно плотный рулон. Это натяжение должно оставаться неизменным при любой скорости.

Казалось бы, вопрос можно решить применением простой синхронной передачи с передатчиком, приводимым от вала каландра, и приемником, приводящим валик наката. Однако, такая система не будет работать удовлетворительно потому, что имеется один фактор, усложняющий синхронизацию, это — растяжение (удлинение) бумаги при переходе от каландра к накату. Поэтому последний, наматывая большую длину бумаги, чем выпускаемая каландром, должен вращаться несколько быстрее, чем скорость движения бумаги через каландр. Эта разница составляет долю процента и, будучи точно отрегулирована для определенного сорта бумаги, она должна далее оставаться постоянной. Такая задача может быть решена введением в схему дифференциала, ротор которого весьма медленно вращается, причем скорость приемника, вращающего валик, оказывается равной сумме скоростей передатчика и дифференциала. Ротор последнего приводится от вала каландра через какой-либо редуктор скорости отдельной небольшой синхронной передачей.

Схема синхронной связи нашла применение для поддержания синхронизма положения роторов параллельно включенных индукционных регуляторов, работающих в распределительных сетях для регулирования напряжения. Один из этих регуляторов, управляемый обычным способом, является передатчиком для остальных регуляторов, долженствующих передвигаться синхронно с первым.

Управление от одного передатчика несколькими приемниками с одинаковыми моментами на валу принципиально не отличается от работы одного приемника от одного передатчика. Надлежит лишь отметить, что мощность передатчика должна быть равна сумме мощностей приемников. При разных моментах на валу приемников приемники с меньшими моментами оказываются до известной степени передатчиками для приемников с большими моментами, и наоборот. Случайное затормаживание одного из приемников сказывается на работе всей системы. Таким образом введение большого числа работающих приемников понижает надежность работы всей схемы в целом, благодаря чему чаще применяют систему с двумя машинами.

Наконец, надлежит указать на применение системы синхронной связи для передачи приказаний и отсчетов разного рода на расстоянии. В этой области трехфазные системы по своему распространению уступают системам на однофазном переменном токе (об этом см. далее).

Весьма существенным является применение схем на трехфазном токе для синхронизирования работы нескольких приводных двигателей, преимущественно электрических (разводные мосты, краны и т. п.). Этот вопрос будет рассмотрен далее в связи с другими методами синхронизирования вращения двигателей, механически между собой не связанных.

Из отмеченного выше ясно, что область применения разобранных систем весьма обширна, причем она имеет сильную тенденцию к еще большему расширению в связи с растущей автоматизацией производственных процессов и рационализированием работы машин - орудий.

ГЛАВА XXV.

ИНДУКЦИОННЫЕ МАШИНЫ В СХЕМАХ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ НА ОДНОФАЗНОМ ТОКЕ НЕИЗМЕННОЙ ЧАСТОТЫ.

152. Общие данные. Системы на однофазном токе с индукционными машинами получили весьма широкое распространение преимущественно в качестве устройств для передачи указаний на расстояние, т. е. с весьма малым рабочим моментом на валу приемника. Машины системы выполняются по типу асинхронных машин с однофазной первичной обмоткой и трехфазной вторичной. Первичная обмотка может быть расположена как на статоре, так и на роторе, а вторичная соответственно на роторе или статоре.

На рис. 194 изображена схема синхронной передачи, применяемой фирмами AEG и Siemens, с маши-

нами, имеющими в качестве первичной части статор с однофазной обмоткой, а вторичной — ротор с обмоткой типа трехфазной.

Однофазный переменный ток создает в статоре каждой машины пульсирующий однофазный поток, который индуцирует во вторичных обмотках три э. д. с., совпадающих по фазе, но отличающихся друг от друга по величине, что зависит от различного положения каждой из трех обмоток ротора машины относительно обмотки статора.

При одинаковых положениях роторов передатчика и приемника вторичные э. д. с. одного ротора уравновешивают вторичные э. д. с. другого, и в цепи роторов ток отсутствует.

При сдвигании роторов на некоторый угол θ величины э. д. с. в соответственных обмотках роторов оказываются различными (по фазе они по-

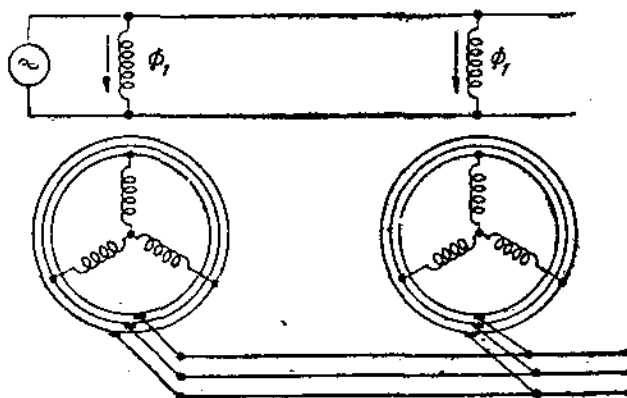


Рис. 194.

прежнему совпадают, так как система однофазная), в силу чего возникает уравнивающий ток, вызывающий вращающие моменты в машинах, стремящиеся, так же как и в трехфазной системе, привести роторы в одинаковое положение по отношению к обмоткам статоров.

Существенно отметить, что благодаря наличию пульсирующего поля, а не вращающегося, условия работы системы при повороте в обе стороны оказываются одинаковыми.

Фирма GEC применяет машины с однофазной первичной обмоткой на роторе (рис. 195), который по своей конструкции

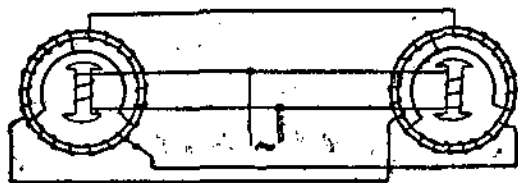


Рис. 195.

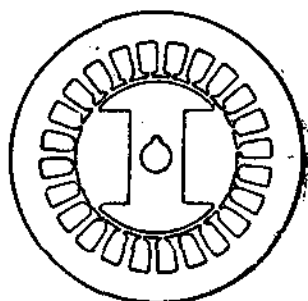


Рис. 196.

напоминает ротор двухполюсного синхронного генератора с явно выраженными полюсами (рис. 196) и снабжен однофазной сосредоточенной обмоткой.

В электрическом отношении передатчик и приемник тождественны. На валу ротора приемника обычно устанавливают демпфер (рис. 197), служащий для устранения колебаний и состоящий из свинцового кольца 1, опирающегося при помощи фрикционно с ним связанных пластин 2, 3 на муфту 4, укрепленную на валу.

Указанное кольцо обладает значительной инерцией и с большим трением может вращаться на муфте, в силу чего при колебаниях ротора оно проворачивается на последней, чем и создается большой эффект затухания.

Точность работы системы зависит, как и во всех конструкциях с эластичной связью с осью, от характера нарастания кривой синхронизирующего момента $M_s = f(\theta)$ и величины нагрузки на валу.

Система при включении в сеть автоматически устанавливается на совпадение осей и поэтому при двухполюсном выполнении и работе в пределах одного оборота может быть названа самосинхронизирующей (обычно носит название „Selsyn“). Теория системы при работе с различными скоростями довольно сложна, благодаря тому, что токи, действующие во вторичных обмотках, не являются синусоидальными, а получаются в результате наложения двух гармоник различной частоты (подобно однофазному асинхронному двигателю).

При рассмотрении работы указанных машин можно исходить из обычного приема для исследования однофазных машин — разложения пульсирующего поля на два вращающихся в противоположные стороны поля с половинной амплитудой. Каждое из этих полей индуцирует во вторичной обмотке э. д. с. (при вращении различной периодичности), которые

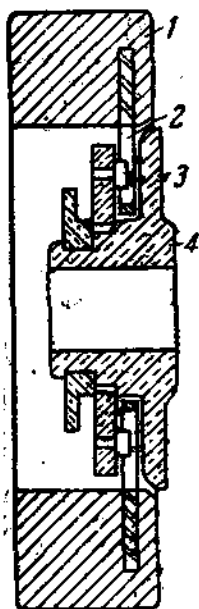


Рис. 197.

при сдвиге роторов передатчика и приемника создают токи, взаимодействующие каждый со своим полем. Как показывают исследования, кривые вращающих моментов в функции угла θ при определенных скоростях и активных сопротивлениях вторичной обмотки подобны кривым моментов однофазного асинхронного двигателя в функции скольжения и примерно при тех же активных сопротивлениях.

Величина вращающих моментов в системе на трехфазном токе больше, чем в системе на однофазном токе при тех же габаритах машин. Синхронизирующий момент $\left(\frac{dM}{d\theta}\right)$ также в первой системе больше, чем в однофазной системе с неизменным воздушным зазором (при $\theta \approx 0$ примерно в два раза).

Рассмотрим вначале наиболее простой случай — работу схемы с одним приемником, управляемым от одного передатчика.

153. Соотношения э. д. с. и токов системы на однофазном токе. Предположим, что система, например, выполненная по типу фирмы Сименс (первичная обмотка на статоре) с неизменным воздушным зазором

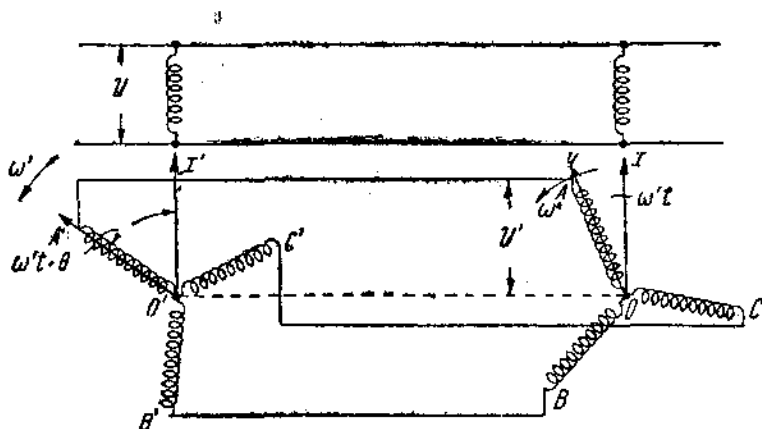


Рис. 198.

вращается с некоторой угловой скоростью ω' (рис. 198) при частоте питающего тока f , соответствующей угловой скорости изменения тока $\omega = 2\pi f$. Машин системы для простоты полагаем двухполюсными. Благодаря некоторой нагрузке на валу приемника ротор его сдвинут по отношению ротора передатчика в сторону, противоположную вращению, на угол θ .

Будем исходить из общих выражений для мгновенных значений э. д. с. первичной и вторичной обмоток машины. Напишем для приемника:

$$\left. \begin{aligned} u + e_1 &= r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}; \\ u' + e_2 &= r_2 i_2 + \mathcal{L}_2 \frac{di_2}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (177).$$

где $\mathcal{L}_2$ — коэффициент самоиндукции одной фазы вторичной обмотки с учетом взаимной индукции с соседними фазами, а u' — мгновенное значение вторичного напряжения (величины u и u' рассматриваются как падения на-

пряжения). Примем для передатчика те же обозначения, но со значком „'“. Тогда получим:

$$\left. \begin{aligned} u + e_1' &= r_1' i_1' + L_1' \frac{di_1'}{dt}; \\ u' + e_2' &= -r_2' i_2' - \mathfrak{L}_2' \frac{di_2'}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (178)$$

Величины $\mathfrak{L}_2$ и $\mathfrak{L}_2'$ представляют собой кажущиеся коэффициенты самоиндукции. Выразим их значения через действительные коэффициенты самоиндукции L_2 и L_2' одной фазы.

Например, для первой фазы вторичной обмотки можем написать:

$$(u')_1 + (e_2)_1 = r_2 (i_2)_1 + L_2 \frac{d(i_2)_1}{dt} + m_{21} \frac{d(i_2)_2}{dt} + m_{31} \frac{d(i_2)_3}{dt}, \quad (179)$$

где m_{21} и m_{31} — коэффициенты взаимоиנדукции между первой и соответственно второй и третьей фазами. (Значки у мгновенных величин тока i_2 показывают принадлежность его к той или другой фазе.)

Считая, что в воздушном зазоре имеет место радиальное поле с синусоидальным распределением, можем принять:

$$m_{21} = L_2 \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{L_2}{2}$$

и

$$m_{31} = L_2 \cos \frac{4\pi}{3} = -\frac{L_2}{2},$$

что дает следующее выражение э. д. с.:

$$(u')_1 + (e_2)_1 + L_2 \frac{d(i_2)_1}{dt} - \frac{L_2}{2} \frac{d[(i_2)_2 + (i_2)_3]}{dt}. \quad (180)$$

Так как

$$(i_2)_2 + (i_2)_3 = -(i_2)_1,$$

получим окончательно:

$$(u')_1 + (e_2)_1 = r_2 (i_2)_1 + \frac{3}{2} L_2 \frac{d(i_2)_1}{dt}. \quad (181)$$

Здесь $\mathfrak{L}_2 = \frac{3}{2} L_2$ для каждой фазы.

Коэффициент рассеяния машины будет иметь значение:

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = 1 - \frac{3M^2}{2L_1 \mathfrak{L}_2},$$

где M — максимальный коэффициент взаимоиנדукции первичной обмотки и любой из фаз вторичной обмотки, имеющий место, когда ось этой фазы совпадает с осью первичной обмотки.

Для цепи роторов машин можем написать (для любой фазы):

$$Ri_2 + \mathfrak{L} \frac{di_2}{dt} - e_2 + e_2' = 0, \quad (181')$$

где $R = r_2 + r_2' + \rho$ (ρ — сопротивление соединительных проводов при длинной линии), а $\mathfrak{L} = \mathfrak{L}_2 + \mathfrak{L}_2'$.

Найдем теперь выражения для e_1, e_1', e_2, e_2' .

Полный поток Φ_2 , созданный вторичной обмоткой приемника и сцепленный с первичной его обмоткой, можно выразить следующим образом:

$$\Phi_2 = M \left[(i_2)_1 \cos \omega' t + (i_2)_2 \cos \left(\omega' t + \frac{2\pi}{3} \right) + (i_2)_3 \cos \left(\omega' t + \frac{4\pi}{3} \right) \right]. \quad (182)$$

Следует отметить, что величина мгновенного значения m коэффициента M зависит от расположения фазы вторичной обмотки относительно первичной обмотки, которое определяется углом $\omega' t$.

Каждый из вторичных токов отдельных фаз можно рассматривать состоящим из двух токов I_2' и I_2'' (частоты $\omega + \omega'$ и $\omega - \omega'$), обусловленных двумя вращающимися в противоположные стороны потоками статора.

$$\left. \begin{aligned} (i_2)_1 &= I_2' \sqrt{2} \sin [(\omega + \omega') t - \varphi_2'] + I_2'' \sqrt{2} \sin [(\omega - \omega') t - \varphi_2'']; \\ (i_2)_2 &= I_2' \sqrt{2} \sin \left[(\omega + \omega') t - \varphi_2' + \frac{2\pi}{3} \right] + I_2'' \sqrt{2} \sin \left[(\omega - \omega') t - \varphi_2'' - \frac{2\pi}{3} \right]; \\ (i_2)_3 &= I_2' \sqrt{2} \sin \left[(\omega + \omega') t - \varphi_2' + \frac{4\pi}{3} \right] + I_2'' \sqrt{2} \sin \left[(\omega - \omega') t - \varphi_2'' - \frac{4\pi}{3} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (183)$$

Фазы здесь пронумерованы в направлении вращения системы (см. рис. 198). φ_2' и φ_2'' — углы отставания токов от соответственных напряжений; токи I_2' и I_2'' представляют действующие значения.

Следует отметить, что один из двух вращающихся потоков статора, вращающийся в сторону вращения роторов системы, пересекает обмотки последних со скоростью $\omega - \omega'$, индуцируя в них э. д. с. и токи частоты $f_2'' \equiv \omega - \omega'$, в то время как второй поток, вращающийся в сторону, противоположную вращению системы, пересекает обмотки роторов со скоростью $\omega + \omega'$, создавая в них э. д. с. и токи частоты $f_2' \equiv \omega + \omega'$. Подставляя написанные выражения для токов в выражение для Φ_2 и производя соответствующие преобразования (разложение на сумму двух синусов синуса суммы углов $\omega \pm \omega'$), окончательно получим:

$$\Phi_2 = \frac{3M}{3} [I_2' \sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi_2') + I_2'' \sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi_2'')]. \quad (184)$$

(При преобразованиях получаются три члена частоты $\omega + 2\omega'$, отличающиеся друг от друга на $\frac{4\pi}{3}$; они в сумме дают нуль, так же как и члены с частотой $\omega - 2\omega'$).

Таким образом, как и следовало ожидать, два вращающихся в разные стороны потока ротора дают один пульсирующий поток Φ_2 . Отсюда для мгновенного значения первичной э. д. с. приемника получим:

$$e_1 = - \frac{d\Phi_2}{dt} = - \frac{3M}{2} \omega [I_2' \sqrt{2} \cos (\omega t - \varphi_2') + I_2'' \sqrt{2} \cos (\omega t - \varphi_2'')]. \quad (185)$$

Наоборот, пульсирующий поток первичной обмотки, как уже отмечалось, можно представить состоящим из двух вращающихся потоков Φ_1' и Φ_1'' половинной амплитуды. Напишем подобное выражение для потока, сцепляющегося с первой фазой:

$$(\Phi_1)_1 = M \frac{I_1}{2} \sqrt{2} \sin [(\omega + \omega') t - \varphi_1] + M \frac{I_1}{2} \sqrt{2} \sin [(\omega - \omega') t - \varphi_1]. \quad (186)$$

Таким же образом можно написать выражения для того же потока статора, но сцепляющегося со второй и третьей фазами обмотки ротора $[(\Phi_1)_2 \text{ и } (\Phi_1)_3]$ с учетом того, что эти фазы сдвинуты относительно первой фазы соответственно на углы $+\frac{2\pi}{3}$ и $+\frac{4\pi}{3}$ по отношению к потоку Φ_1' , вращающемуся в сторону, противоположную вращению ротора, и на углы $-\frac{2\pi}{3}$ и $-\frac{4\pi}{3}$ по отношению к потоку Φ_1'' , вращающемуся с ротором согласно.

На основании выражений для $(\Phi_1)_1$; $(\Phi_1)_2$ и $(\Phi_1)_3$ получим выражения для э. д. с. e_2 фаз ротора приемника:

$$(e_2)_1 = -M \frac{I_1}{2} \sqrt{2} \{(\omega + \omega') \cos [(\omega + \omega') t - \varphi_1] + (\omega - \omega') \cos [(\omega - \omega') t - \varphi_1]\} \quad (187)$$

и соответственно для э. д. с. $(e_2)_2$ и $(e_2)_3$.

Из выражений для e_2 видим, что э. д. с. во вторичной обмотке представляют сумму двух синусоидальных трехфазных э. д. с. с противоположным порядком следования фаз и частотами, пропорциональными соответственно угловым скоростям $(\omega + \omega')$ и $(\omega - \omega')$.

Подобным же образом могут быть написаны выражения и для передатчика при учете того обстоятельства, что ротор последнего сдвинут по вращению на угол θ относительно ротора приемника. Для вторичного потока передатчика, сцепляющегося с первичной его обмоткой, имеем выражение:

$$\Phi_2' = M' [-(i_2)_1 \cos (\omega' t + \theta) - (i_2)_2 \cos (\omega' t + \theta + \frac{2\pi}{3}) - (i_2)_3 \cos (\omega' t + \theta + \frac{4\pi}{3})]. \quad (188)$$

(M' — максимальный коэффициент взаимной индукции передатчика).

Токи отдельных фаз ротора $(i_2')_{1,2,3}$ передатчика могут быть представлены следующим образом:

$$(i_2')_2 = -(i_2)_1; \quad (i_2')_3 = -(i_2)_2; \quad (i_2')_1 = -(i_2)_3.$$

Делая соответствующие подстановки значений токов $(i_2)_{1,2,3}$ после таких же, как и выше, преобразований, получим:

$$\Phi_2' = -\frac{3M'}{2} [I_2 \sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi_2' - \theta) + I_2'' \sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi_2'' + \theta)], \quad (189)$$

куда:

$$e_1' = -\frac{d\Phi_2'}{dt} = \frac{3M'}{2} \omega [I_2' \sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi_2' - \theta) + I_2'' \sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi_2'' + \theta)]. \quad (190)$$

Следует отметить, что э. д. с. e_1 и e_1' направлены навстречу друг другу, что и дает разные знаки.

Точно также в передатчике для потока первичной обмотки, сцепленного различными фазами ротора, можно написать выражения, каждое из которых будет состоять из двух членов, представляющих собой вращающиеся разные стороны потоки с половинными амплитудами:

$$(\Phi_1')_1 = M' \cdot \frac{I_1'}{2} \sqrt{2} \sin[(\omega + \omega')t - \varphi_1' + \theta] + M' \cdot \frac{I_1'}{2} \sqrt{2} \sin[(\omega - \omega')t - \varphi_1' - \theta]. \quad (191)$$

Такие же выражения получатся для потоков $(\Phi_1')_2$ и $(\Phi_1')_3$, но с введением углов $\pm \frac{2\pi}{3}$ и $\pm \frac{4\pi}{3}$.

Для э. д. с. ротора передатчика $(e_2')_{1,2,3}$ также будем иметь:

$$(e_2')_1 = -M' \cdot \frac{I_1'}{2} \sqrt{2} \{(\omega + \omega') \cos[(\omega + \omega')t - \varphi_1' + \theta] + (\omega - \omega') \cos[(\omega - \omega')t - \varphi_1' - \theta]\} \quad (192)$$

Подобные же выражения, отличающиеся соответственно на углы $\pm \frac{2\pi}{3}$ и $\pm \frac{4\pi}{3}$, получим для э. д. с. $(e_2')_2$ и $(e_2')_3$.

Если за исходную величину принять приложенное напряжение U , то все величины токов и э. д. с. системы могут быть написаны в комплексном виде следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U; \\ \dot{I}_1 &= I_1 (\cos \varphi_1 - j \sin \varphi_1); \\ \dot{E}_1 &= M \frac{3}{2} j \omega M (\dot{I}_2' + \dot{I}_2''). \end{aligned}$$

В выражение для E_1 войдет угол θ .

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \frac{3}{2} \omega M' \left\{ \dot{I}_2' \left(\cos \frac{\pi}{2} - \theta \right) + j \sin \left[\left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \dot{I}_2'' \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \right] + j \sin \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \right\} = \\ &= \frac{3}{2} \omega M' [\dot{I}_2' (\sin \theta + j \cos \theta) + \dot{I}_2'' (-\sin \theta + j \cos \theta)], \quad (193) \end{aligned}$$

$$\dot{I}_2' = I_2' (\cos \varphi_2' - j \sin \varphi_2') \text{ и } \dot{I}_2'' = I_2'' (\cos \varphi_2'' - j \sin \varphi_2'').$$

Во вторичных обмотках системы (в каждой фазе) будут иметь место

$$\text{д. с. и токи двух частот } f_2' = \frac{\omega + \omega'}{2\pi} \text{ и } f_2'' = \frac{\omega - \omega'}{2\pi}.$$

В табл. XI приведены гармоники той и другой частоты.

ТАБЛИЦА XI.

Электрич. величины вторичн. обмотки	Частота $f_2' = \frac{\omega + \omega'}{2\pi}$	Частота $f_2'' = \frac{\omega - \omega'}{2\pi}$
i_2	$\dot{I}_2' = I_2' (\cos \varphi_2' - j \sin \varphi_2')$	$\dot{I}_2'' = I_2'' (\cos \varphi_2'' - j \sin \varphi_2'')$
e_2	$-j (\omega + \omega') \frac{M \dot{I}_1}{2}$	$-j (\omega - \omega') \frac{M \dot{I}_1}{2}$
e_2'	$(\omega + \omega') M' \frac{\dot{I}_1'}{2} \left[\cos \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) + \right.$ $\left. + j \sin \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right] =$ $= \frac{\omega + \omega'}{2} M' \dot{I}_1' (\sin \theta - j \cos \theta);$	$(\omega - \omega') M' \frac{\dot{I}_1'}{2} \left[\cos \left(-\theta - \frac{\pi}{2} \right) + \right.$ $\left. - j \sin \left(-\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right] =$ $= (\omega - \omega') M' \frac{\dot{I}_1'}{2} (-\sin \theta - j \cos \theta)$

На основании полученных соотношений исходные уравнения для первичных обмоток могут быть написаны в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 (r_1 + j\omega L_1) \dot{I}_1 + \frac{3}{2} j \omega M (\dot{I}_2' + \dot{I}_2'') &= U; \\
 (r_1' + j\omega L_1') \dot{I}_1' - \frac{3}{2} \omega M' [\dot{I}_2' (\sin \theta + j \cos \theta) + \\
 + \dot{I}_2'' (-\sin \theta - j \cos \theta)] &= U.
 \end{aligned} \quad (194)$$

Для цепи вторичных обмоток уравнение (194) распадается на два уравнения двух категорий гармонических (частоты $f_2' \equiv \omega + \omega'$ и $f_2'' \equiv \omega - \omega'$):

$$\left. \begin{aligned}
 [R + j(\omega + \omega') \mathfrak{L}] \dot{I}_2' + j(\omega + \omega') M \frac{\dot{I}_1}{2} + \\
 + (\omega + \omega') M' \frac{\dot{I}_1'}{2} (\sin \theta - j \cos \theta) &= 0; \\
 [R + j(\omega - \omega') \mathfrak{L}] \dot{I}_2'' + j(\omega - \omega') M \frac{\dot{I}_1}{2} - \\
 - (\omega - \omega') M' \frac{\dot{I}_1'}{2} (\sin \theta + j \cos \theta) &= 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (195)$$

154. Выражения для определения токов системы в зависимости от угла θ . Полученные выше выражения могут быть использованы для установления зависимости между величиной токов системы и углом θ , для чего указанным выражениям нужно придать более удобный вид. Так же, как и при рассмотрении трехфазной системы, предположим, что параметры передатчика и приемника совершенно одинаковы. Такое предположение, являясь вполне реальным в системе с двумя машинами, весьма упростит все соотношения.

Следовательно, полагаем

$$L_1 = L_1'; r_1 = r_1'; \mathfrak{L}_2 = \mathfrak{L}_2'; r_2 = r_2'$$

$$M = M'; \mathfrak{L} = \mathfrak{L}_2 + \mathfrak{L}_2' = 2 \mathfrak{L}_2.$$

Далее положим, что

$$\frac{M}{L_1} = \frac{M'}{L_1'} = \tau_1;$$

$$\frac{M}{\mathfrak{L}_2} = \frac{M'}{\mathfrak{L}_2'} = 2 \frac{M}{\mathfrak{L}} = 2 \frac{M'}{\mathfrak{L}} = \tau_2.$$

Ранее было установлено, что коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{3M^2}{2L_1\mathfrak{L}_2},$$

откуда получим:

$$\frac{3}{2} \tau_1 \tau_2 = 1 - \sigma.$$

Так же, как и при исследовании системы с индукционными машинами на трехфазном токе, положим:

$$\frac{r_1}{\omega L_1} = \frac{r_1'}{\omega L_1'} = \varepsilon_1;$$

$$\frac{R}{\omega \mathfrak{L}} = \varepsilon_2.$$

Обозначим теперь отношение между угловой скоростью ротора и угловой скоростью частоты пульсирующего тока сети через $k = \frac{\omega'}{\omega}$, что в случае однофазного тока более удобно, чем выражение через скольжение s , представляющее собой отношение скорости вращения ротора к скорости вращения отдельных вращающихся полей. Подставив принятые обозначения в выражения (194), (195), напомним их в следующем виде:

$$\begin{aligned} (1 - j\varepsilon_1) \dot{I}_1 + \frac{3}{2} \tau_1 (\dot{I}_2' + \dot{I}_2'') &= -j \frac{U}{\omega L_1}; \\ (1 - j\varepsilon_1) \dot{I}_1' - \frac{3}{2} \tau_1 [\dot{I}_2' (\cos \theta - j \sin \theta) + \\ &+ \dot{I}_2'' (\cos \theta + j \sin \theta)] = -\frac{jU}{\omega L_1}; \\ (1 + k) \tau_2 \frac{\dot{I}_1}{4} - (1 + k) \tau_2 \frac{\dot{I}_2'}{4} (\cos \theta + j \sin \theta) + \\ &+ \dot{I}_2' (1 + k - j\varepsilon_2) = 0; \\ (1 - k) \tau_2 \frac{\dot{I}_1}{4} - (1 - k) \tau_2 \frac{\dot{I}_1'}{4} (\cos \theta - j \sin \theta) + \\ &+ \dot{I}_2'' (1 - k - j\varepsilon_2) = 0. \end{aligned} \quad (196)$$

Из этих уравнений могут быть определены первичные и вторичные токи системы. Следует заметить, что уравнения несколько не изменятся, если k заменить через $-k$, θ на $-\theta$ и $\dot{I}_2'$ на $\dot{I}_2''$; это свидетельствует о том, что работа системы совершенно одинакова при обоих направлениях вращения, чего не было в системе на трехфазном токе.

155. Случай работы системы при синхронной скорости. При вращении роторов системы с угловой скоростью $\omega' = \omega$, т. е. $k = 1$, одно из двух вращающихся в противоположные стороны полей, именно синхронное поле, оказывается неподвижным относительно обмотки ротора и поэтому не индуцирует в ней никакой э. д. с. ($\dot{E}_2'' = 0$ и $\dot{I}_2'' = 0$). Второе поле вращается относительно ротора со скоростью $\omega + \omega' = 2\omega$, вызывая э. д. с. и токи двойной частоты. Этот случай подобен работе системы на трехфазном токе при вращении роторов с синхронной скоростью в сторону, противоположную вращению поля, т. е. при $s = 2$ (см. рис. 187). Максимальный момент приемника в этом режиме работы меньше максимального момента передатчика. Если сравнить оба типа синхронной передачи в указанном режиме, то при всех прочих равных условиях максимальный момент системы на однофазном токе должен быть значительно ниже (примерно в четыре раза), так как с ротором взаимодействует поток с амплитудой, составляющей половину от амплитуды полного потока, соответствующего приложенному напряжению, т. е. однофазная машина в этом случае эквивалентна трехфазной с напряжением, уменьшенным наполовину.

Положив $\dot{I}_2'' = 0$ в первых трех уравнениях и решив их относительно $\dot{I}_1$, $\dot{I}_1'$ и $\dot{I}_2'$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{2 - \frac{1-\sigma}{2}(1 + \cos \theta) - j[\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1 + \frac{1-\sigma}{2} \sin \theta]}{3\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + j(1 + \sigma)}; \\ \dot{I}_1' &= \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{2 - \frac{1-\sigma}{2}(1 + \cos \theta) - j[\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1 - \frac{1-\sigma}{2} \sin \theta]}{3\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + j(1 + \sigma)}; \\ \dot{I}_2' &= \frac{\tau_2}{2} \cdot \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{-1 + \cos \theta + j \sin \theta}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + j(1 - \sigma)}. \end{aligned} \right\} \quad (197)$$

В этих выражениях членами ε_1 и ε_2 в степени выше первой пренебрегаем, так как и сами указанные величины очень малы.

Далее, также как и в предыдущей главе, можем первоначально пренебречь активным сопротивлением обмоток и потерями холостого хода. В этом случае сеть доставляет чисто реактивный ток, так как активный ток будет циркулировать только в системе и затраченная мощность на валу передатчика при его вращении будет целиком поступать на вал приемника. Следовательно, здесь можно провести полную аналогию с эластичным механическим валом, имеющим некоторый угол скручивания. Разница лишь та, что в первом случае вместо самого вала применены легкие электрические проводники.

Тогда для случая $\varepsilon_1 = 0$ и $\varepsilon_2 = 0$ имеем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{-\frac{1-\sigma}{2} \sin \theta - j \left[2 - \frac{1-\sigma}{2}(1 + \cos \theta) \right]}{1 + \sigma}; \\ \dot{I}_1' &= \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{\frac{1-\sigma}{2} \sin \theta - j \left[2 - \frac{1-\sigma}{2}(1 + \cos \theta) \right]}{1 + \sigma}; \\ \dot{I}_2' &= \tau_2 \frac{U}{2\omega L_1} \cdot \frac{\sin \theta + j(1 - \cos \theta)}{1 + \sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (198)$$

При $\theta = 0$ (холостой ход системы), как и следовало ожидать, токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_1'$ являются намагничивающими токами и равны $\frac{U}{\omega L_1}$. При $\theta = 180^\circ$ значение

их возрастает до $\frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{2}{1+\sigma}$ (двойное значение). Коэффициент мощности в обоих случаях равен нулю.

При $0 < \theta < 180^\circ$ коэффициенты мощности не равны нулю, причем первичная обмотка приемника, как уже отмечалось, отдает обратно в сеть энергию ($\cos \varphi_1 < 0$), поглощенную первичной обмоткой передатчика ($\cos \varphi_1' > 0$).

Величина тока в цепи роторов при изменении угла θ от 0 до 180° будет меняться в пределах от 0 до $\frac{\tau_2}{1+\sigma} \cdot \frac{UV\sqrt{2}}{\omega L_1}$.

Очевидно, что все кривые симметричны при повороте ротора от 0 до 180° в случае того или другого направления вращения. Кривые для первичного и вторичного токов, построенные для $\sigma = 0,1$, соответственно представлены на рис. 199 и 200 (кривые 1).

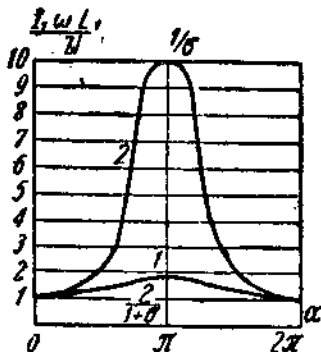


Рис. 199.

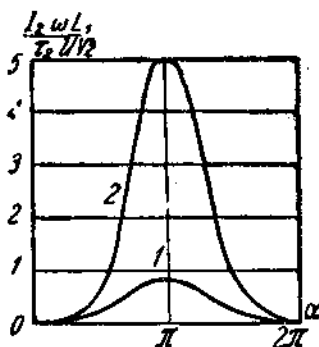


Рис. 200.

156. Случай работы системы при любой скорости и отсутствии активных сопротивлений. Допустим, опять-таки первоначально, что $\epsilon_1 = 0$ и $\epsilon_2 = 0$. Это значительно упростит решение общих выражений (196), которое иначе получилось бы весьма сложным. Далее наличие активных сопротивлений будет учтено.

При подстановке $\epsilon_1 = 0$ и $\epsilon_2 = 0$ два последних выражения (196) имеют во всех членах соответственно множители $(1+k)$ и $(1-k)$, которые не равны нулю, так как мы считаем, что $k \neq 1$. Поэтому на эти множители можно разделить оба члена. Отсюда можем сделать вывод, что при $r_1 = 0$ и $r_2 = 0$ электрические характеристики системы не зависят от скорости вращения, если она существенно отличается от частоты сети.

Для трехфазной системы мы получили, что электрические характеристики при отсутствии в системе активных сопротивлений не зависят от скорости вращения (см. рис. 175).

Решение общих выражений (196) при указанных допущениях имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_1' = -j \cdot \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{2}{1+\sigma + (1-\sigma) \cos \theta}; \\ \dot{I}_2' &= \frac{\tau_2}{2} \cdot \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{-\sin \theta + j(1-\cos \theta)}{1+\sigma + (1-\sigma) \cos \theta}; \\ \dot{I}_2'' &= \frac{\tau_2}{2} \cdot \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{\sin \theta + j(1-\cos \theta)}{1+\sigma + (1-\sigma) \cos \theta}. \end{aligned} \right\} \quad (199)$$

Следовательно, действующее значение первичных токов равно:

$$I_1 = I_1' = \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{2}{1 + \sigma + (1 - \sigma) \cos \theta} \quad (300)$$

Относительно напряжения они сдвинуты в сторону отставания на 90° (чисто реактивные токи). Зависимость их от угла θ дана на рис. 199, кривая 2, построенная для $\sigma = 0,1$, причем от $\theta = 0$ до $\theta = 180^\circ$ токи $I_1 = I_1'$ меняются в пределах $\frac{U}{\omega L_1}$ до $\frac{U}{\sigma \omega L_1}$ (короткое замыкание).

Выражения для действующих значений вторичных токов $I_2' = I_2''$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} I_2' = I_2'' &= \frac{\tau_2 U}{2\omega L_1} \cdot \frac{\sqrt{\sin^2 \theta + (1 - \cos \theta)^2}}{1 + \sigma + (1 - \sigma) \cos \theta} = \frac{\tau_2 U}{2\omega L_1} \frac{\sqrt{2(1 - \cos \theta)}}{1 + \sigma + (1 - \sigma) \cos \theta} = \\ &= \frac{\tau_2 U}{\omega L_1} \cdot \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{1 + \sigma + (1 - \sigma) \cos \theta} \end{aligned} \quad (201)$$

Действующее значение результирующего вторичного тока:

$$\begin{aligned} I_2 &= \sqrt{I_2'^2 + I_2''^2} = I_2' \sqrt{2} = I_2'' \sqrt{2} = \\ &= \tau_2 \frac{U \sqrt{2}}{\omega L_1} \cdot \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{1 + \sigma + (1 - \sigma) \cos \theta} \end{aligned} \quad (202)$$

Указанный ток изменяется при изменении θ от 0 до 180° в следующих пределах

$$\text{от } 0 \text{ до } \frac{\tau_2 U \sqrt{2}}{2\sigma \omega L_1}.$$

Кривая изменения тока I_2 изображена на рис. 200 для $\sigma = 0,1$ (кривая 2). Таким образом, если сравнить на рис. 199 и 200 кривые при $k = 1$ и $k \neq 1$, то можно сделать вывод, что при переходе к синхронной скорости будет иметь место резкий скачок значения тока (первичного и вторичного), т. е. в изменении тока от скорости имеется прерывность. В действительности подобного резкого перехода нет, так как на величину тока I_2'' влияет активное сопротивление, которым мы пренебрегли.

При подходе к синхронизму синхронно-вращающееся поле будет индуцировать в роторе все меньшую и меньшую э. д. с., пропорциональную скорости $\omega - \omega'$. Однако, вместе с этим будет уменьшаться и реактивное сопротивление вторичной обмотки $(\omega - \omega') L_2 \sigma$, следовательно величина тока I_2'' окажется неизменной при уменьшении $(\omega - \omega')$ и $r_2 = 0$. В действительности же ток I_2'' при подходе к синхронизму будет сильно уменьшаться благодаря наличию постоянной величины r_2 , что и создает плавный переход к режиму работы при $k = 1$ ($s = 0$ для синхронного поля и $s = 2$ для обратно-синхронного поля). В соответствии с этим будет иметь место плавное изменение токов и в статоре.

157. Случай работы системы при любой скорости и учете активных сопротивлений. Учет активных сопротивлений (ε_1 и $\varepsilon_2 \neq 0$) дает весьма сложные выражения, вывод которых мы не приводим, а наме-

тим лишь общий его ход.¹ Удобно вместо двух последних уравнений из выражений (196) применить сумму и разность их с тем, чтобы внести в них сумму и разность составляющих вторичного тока $(I_2' + I_2'')$ и $(I_2' - I_2'')$.

Тогда выражения (196) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} (1-j\varepsilon_1) I_1 + \frac{3}{2} \tau_1 (I_2' + I_2'') &= -j \frac{U}{\omega L_1}; \\ (1-j\varepsilon_1) I_1' + \frac{3}{2} j \tau (I_2' - I_2'') \sin \theta - \frac{3}{2} \tau_1 (I_2' + \\ &+ I_2'') \cos \theta = -j \frac{U}{\omega L_1}; \\ \frac{\tau_2}{2} I_1 - \frac{\tau_2}{2} I_1' (\cos \theta + j k \sin \theta) + k (I_2' - I_2'') + \\ &+ (1-j\varepsilon_2) (I_2' + I_2'') = 0; \\ \frac{\tau_2}{2} I_1 k - \frac{\tau_2}{2} I_1' (k \cos \theta + j \sin \theta) + \\ &+ (1-j\varepsilon_2) (I_2' - I_2'') + k (I_1' + I_2'') = 0. \end{aligned} \right\} \quad (203)$$

Далее решение этих выражений можно выполнить по общему методу определяющих. Тогда искомые величины получают значения:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{x_1 + j y_1}{p + j q}; \\ I_1' &= \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{x_1' + j y_1'}{p + j q}; \\ I_2' - I_2'' &= \frac{\tau_2 U}{2 \omega L_1} \cdot \frac{x_d + j y_d}{p + j q}; \\ I_2' + I_2'' &= \frac{\tau_2 U}{2 \omega L_1} \cdot \frac{x_t + j y_t}{p + j q}. \end{aligned} \right\} \quad (204)$$

Эффективные значения первичных токов:

$$I_1 = \frac{U}{\omega L_1} \sqrt{\frac{x_1^2 + y_1^2}{p^2 + q^2}}; \quad I_1' = \frac{U}{\omega L_1'} \sqrt{\frac{x_1'^2 + y_1'^2}{p^2 + q^2}}. \quad (205)$$

Значения для $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$ с целью определения сдвига между током и напряжением можем получить:

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_1 &= \frac{p x_1 + q y_1}{\sqrt{(p^2 + q^2) (x_1^2 + y_1^2)}}; \\ \cos \varphi_1' &= \frac{p x_1' + q y_1'}{\sqrt{(p^2 + q^2) (x_1'^2 + y_1'^2)}}; \\ \sin \varphi_1 &= \frac{-p y_1 + q x_1}{\sqrt{(p^2 + q^2) (x_1^2 + y_1^2)}}; \\ \sin \varphi_1' &= \frac{-p y_1' + q x_1'}{\sqrt{(p^2 + q^2) (x_1'^2 + y_1'^2)}}. \end{aligned} \right\} \quad (206)$$

¹ Подробнее см. Revue Générale de L'Electricité, XXXIII, № 20, 1933, P. 654. A. Sornelin, La jonction électrique „Siemens“ et ses applications aux „télécommandes“.

Так, на рис. 201 кривая 1 представляет изменение первичного тока при бесконечно большом числе оборотов ($k = \infty$); кривая 2 — при $k = 0$, т. е. при неподвижной системе или весьма малой скорости; кривая 3 — при синхронной скорости ($k = 1$) и кривые 4 и 5 — соответственно для скоростей $k = 1,3$ и $0,9$. Надо заметить, что токи I_1 и I_1' при скоростях, соответствующих кривым 3, 4 и 5, несколько отличаются друг от друга, но для простоты кривые для обоих токов представлены совмещенными. На рис. 202 кривые с теми же обо-

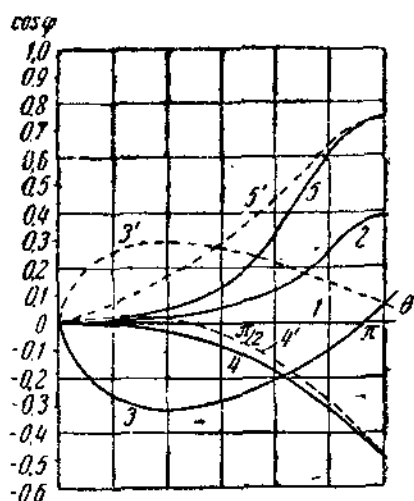


Рис. 202.

значениями соответственно изображают изменение коэффициента мощности при тех же скоростях, что и на рис. 201. Кривые без значков принадлежат приемнику, а кривые со значками „1“ — передатчику. При малых углах θ и небольших скоростях токи I_1 и I_1' почти реактивны. При бесконечно большой скорости $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_1' = 0$.

Следует отметить, что при малых углах θ величина e_2 мало влияет на характеристики токов, равно как и скорость системы. Поэтому в последнем случае, который имеет место для передачи указаний на расстоянии (вращение стрелки), можно пользоваться приближенными формулами, в которых пренебрегается активными сопротивлениями r_1 и r_2 . Если же предполагается работа при больших углах θ (передача более значительных моментов для вращения деталей рабочего или управляющего механизма), влияние скорости и отношения e_2 увеличивается и приходится прибегать к точным формулам.

Из рассмотрения кривых рис. 202 видно, что для скоростей ниже синхронной $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_1'$ положительны. Это свидетельствует о работе обеих машин в режиме двигателя, т. е. обе машины поглощают энергию из сети. При скоростях выше синхронной обе машины посылают энергию

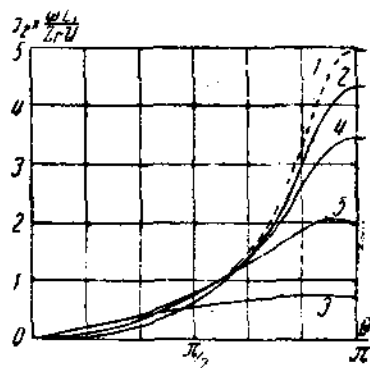


Рис. 203.

в сеть ($\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_1'$ отрицательны). При синхронной скорости происходит передача энергии от передатчика к приемнику и возвращение ее в сеть последним (аналогично тому, как это имеет место в передаче на трехфазном токе при $s=2$).

На рис. 203 даны кривые изменения вторичного тока системы в функции угла θ при различных скоростях.

Нумерация кривых для последних та же, что и на рис. 201, за исключением кривой 4, которая соответствует скорости с отношением $k=0,7$, а не 1,3.

Максимальный возможный ток в системе получается (не считая $k=\infty$) при $k=0$ и $\theta=180^\circ$, чему соответствует выпадение из синхронизма или же включение в сеть при сдвиге роторов на 180° . Опять же следует отметить, что при малых углах θ величина вторичного тока, так же как и первичного, почти не зависит от скорости.

158. Основные выражения для вращающего момента. Для выяснения физической картины работы системы, имеющей на валу приемника некоторый момент, представим графически соотношения между токами

и потоками в приемнике (рис. 204). Как уже отмечалось, пульсирующий поток первичной обмотки можно разложить на два вращающихся в противоположные стороны потока со скоростью ω . Каждый из потоков имеет половинную амплитуду от пульсирующего потока Φ_1 и следовательно равен:

$$\frac{\Phi_1}{2} = M \frac{I_1 \sqrt{2}}{2}.$$

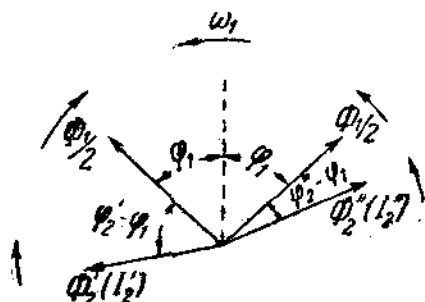


Рис. 204.

Указанные потоки вызываются током I_1 , сдвинутым по фазе относительно приложенного напряжения U на угол φ_1 , и поэтому и они сдвинуты относительно напряжения на тот же угол φ_1 .

Один из потоков $\frac{\Phi_1}{2}$, вращающийся согласно с ротором, перемещается относительно него со скоростью $\omega - \omega'$ и неподвижен относительно потока ротора Φ_2'' , создаваемого током I_2'' частоты $f_2'' = \frac{\omega - \omega'}{2\pi}$ и перемещающегося по ротору со скоростью $\omega - \omega'$. Ток I_2'' сдвинут по фазе относительно напряжения на угол φ_2'' (следовательно и поток Φ_2''). Таким образом сдвиг по фазе между потоками $\frac{\Phi_1}{2}$ и Φ_2'' составляет угол $\varphi_2'' - \varphi_1$.

На основании разобранной картины можем написать для момента, развиваемого в результате взаимодействия потока $\frac{\Phi_1}{2}$ и тока I_2'' во всех фазах следующее общее выражение:

$$M_1 = \frac{3}{2} \Phi_1 I_2'' \sin(\varphi_2'' - \varphi_1) = \frac{3}{2} M I_1 I_2'' \sin(\varphi_2'' - \varphi_1)$$

(здесь M — коэффициент взаимоиндукции).

Таким же образом имеет место взаимодействие между обратно-синхронным потоком $\frac{\Phi_1}{2}$ и потоком Φ_2' , создаваемым током I_2' и вращающимся в сторону, обратную вращению ротора со скоростью $\omega + \omega'$ относительно последнего.

Направление этого момента M_2 будет обратно направлению первого момента, так как вращение потока происходит в сторону, противоположную вращению ротора (аналогично однофазному асинхронному двигателю). Его величина равна:

$$M_2 = -\frac{3}{2} M I_1 I_2' \sin(\varphi_2' - \varphi_1).$$

Кроме того, будут возникать мгновенные моменты от вращающихся в противоположные стороны со скоростью 2ω синхронного потока $\frac{\Phi_1}{2}$ и потока Φ_2' и обратно-синхронного потока $\frac{\Phi_1}{2}$ и потока Φ_2'' . Однако вследствие того, что эти потоки не являются неподвижными друг относительно друга (условие образования постоянно действующего момента это — неподвижность первичного и вторичного потоков), то в результате действие этих мгновенных моментов сводится к нулю.

Таким образом результирующий момент, развиваемый приемником, равен

$$M_{cp} = M_1 + M_2 = \frac{3}{2} M I_1 [I_2'' \sin(\varphi_2'' - \varphi_1) - I_2' \sin(\varphi_2' - \varphi_1)], \quad (209)$$

или

$$M_{cp} = \frac{3}{2} M \bar{I}_1 (\bar{I}_2'' - \bar{I}_2') = -\frac{3}{2} M \bar{I}_1 \cdot \bar{I}_d, \quad (210)$$

т. е. момент пропорционален скалярному произведению вектора $\bar{I}_1$ на вектор $\bar{I}_d$, являющийся геометрической разностью векторов $\bar{I}_2'$ и $\bar{I}_2''$, приведенных к той же частоте, что и ток I_1 .

Пользуясь ранее приведенными выражениями для векторов I_1 и I_d , можно написать:

$$[I_1] \cdot [I_d] = \frac{\tau_2 U^2}{2\omega^2 L_1^2} \cdot \frac{x_1 y_d - x_d y_1}{p^2 + q^2}$$

и, следовательно:

$$M_{cp} = \frac{3M}{4} \cdot \frac{\tau_2 U^2}{\omega_2 L_1^2} \cdot \frac{x_d y_1 - x_1 y_d}{p^2 + q^2}$$

или, заменив τ_2 через $\frac{M}{g_2}$ и $\frac{M^2}{L_1 g_2}$ через $\frac{3}{2} (1 - \sigma)$, будем иметь

$$M_{cp} = \frac{U^2 (1 - \sigma)}{2\omega^2 L_1} \cdot \frac{x_d y_1 - x_1 y_d}{p^2 + q^2}.$$

Подставив в это выражение значения x_1 , y_1 , x_d , y_d , p и q и сделав все необходимые сокращения, получим:

$$M_{cp} = \frac{U^2(1-\sigma)}{2\omega^2 L_1} \cdot \left\{ \left[\frac{1+\sigma}{2} - \frac{1-\sigma}{2} \cos \theta \right] \left[(1-k^2)^2 \sin \theta + \epsilon_2 k (1-k^2)(1-\cos \theta) \right] + \right. \\ \left. + \frac{\epsilon_2^2 (1+\sigma k^2) \sin \theta - \epsilon_2^2 k (\cos \theta)}{\left\{ (1-k^2) \left[\left(\frac{1+\sigma}{2} \right)^2 - \left(\frac{1-\sigma}{2} \right)^2 \cos^2 \theta \right] - \epsilon_2^2 \right\}^2 + \epsilon_2^2 (1-\sigma)^2} \right\}. \quad (211)$$

Таким же образом из рассмотрения графического изображения потоков и токов можно получить исходное выражение для момента передатчика (рис. 205).

Для перехода от рис. 204 к рис. 205 нужно принять во внимание, что ротор передатчика сдвинут относительно ротора приемника на угол θ по

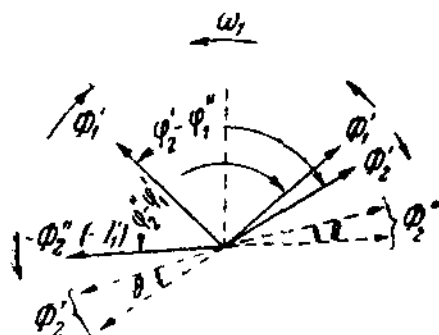


Рис. 205.

направлению вращения, что изменяет на такую же величину углы, образуемые потоками статора и потоками ротора. Кроме того, вторичные токи передатчика равны вторичным токам приемника, но имеют противоположные знаки. Поэтому нужно на рис. 204 вектор потока Φ_2' сдвинуть по направлению вращения ротора, а вектор потока Φ_2'' — против направления его вращения на угол θ (углы между потоками в обоих случаях увеличиваются) и затем повернуть указанные векторы на 180° (рис. 205).

На основании рис. 205 получим общее выражение для вращающего момента передатчика:

$$M'_{cp} = \frac{3}{2} M \cdot I_1' [I_2' \sin (\varphi_2' + \theta - \varphi_1') - I_2'' \sin (\varphi_2'' - \theta - \varphi_1')].$$

Полагая

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \bar{I}_2' (\cos \theta - j \sin \theta) - \bar{I}_2'' (\cos \theta + j \sin \theta) = \\ &= (\bar{I}_2' - \bar{I}_2'') \cos \theta - j (\bar{I}_2' + \bar{I}_2'') \sin \theta, \end{aligned} \quad (212)$$

получим

$$M'_{cp} = \frac{3M}{2} [\bar{I}_1'] \cdot [\bar{I}].$$

Но, заменив $\bar{I}_2' - \bar{I}_2''$ и $\bar{I}_2' + \bar{I}_2''$ их общими выражениями, приведенными выше, можно написать:

$$\bar{I} = \frac{\tau_2 U}{2\omega L_1} \cdot \frac{x_y + jy_y}{p^2 + q^2},$$

$$x_y = -x_d \cos \theta + y_T \sin \theta,$$

где

$$y_y = -y_d \cos \theta - x_T \sin \theta,$$

и следовательно

$$M'_{cp} = \frac{U^2(1-\sigma)}{2\omega^2 L_1} \cdot \frac{x_y y_1' - x_1' y_y}{p^2 + q^2}.$$

Подставляя значения x_1' , y_1' , x_d , y_d , p , q , из уравнений (208) имеем

$$x_y = -(1 - z^2) \left(\frac{1 + \sigma}{2} - \frac{1 - \sigma}{2} \cos \theta \right) \sin \theta + \varepsilon_2 k (1 - \cos \theta);$$

$$y_y = \varepsilon_2 \sin \theta.$$

Окончательно получим:

$$M'_{cp} = - \frac{U^2 (1 - \sigma)}{2 \omega^2 L_1} \cdot \left\{ \left(\frac{1 + \sigma}{2} - \frac{1 - \sigma}{2} \cos \theta \right)^2 [1 - k^2] \sin \theta - \varepsilon_2 k (1 - k^2) (1 - \cos \theta) \right\} +$$

$$+ \frac{\varepsilon_2^2 (1 + \sigma k^2) \sin \theta + \varepsilon_2^2 k (1 - \cos \theta)}{\left\{ (1 - k^2) \left[\left(\frac{1 + \sigma}{2} \right)^2 - \left(\frac{1 - \sigma}{2} \right)^2 \cos^2 \theta \right] - \varepsilon_2^2 \right\}^2 + \varepsilon_2^2 (1 + \sigma)^2} \right\}. \quad (213)$$

Если теперь для сравнения моментов M_{cp} и M'_{cp} приемника и передатчика положить в полученных выражениях (211) и (213) величину $\varepsilon_2 = 0$, т. е. пренебречь активными сопротивлениями в цепи роторов, то величины M_{cp} и M'_{cp} окажутся равны и противоположны по знаку. Следовательно, синхронная передача в этом случае является по существу электрическим валом, аналогичным механическому валу (момент, приложенный к валу передатчика, полностью передается на вал приемника). Подобный же результат был получен при рассмотрении трехфазной синхронной передачи при тех же условиях: $\varepsilon_1 = 0$ и $\varepsilon_2 = 0$ (см. рис. 175). При учете активных сопротивлений моменты на валах приемника и передатчика, так же, как в трехфазной системе, оказываются неравными, причем момент приемника, как

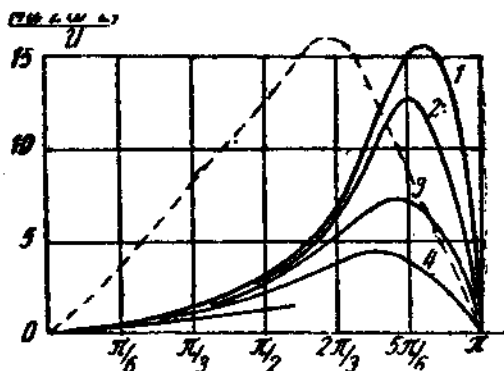


Рис. 206.

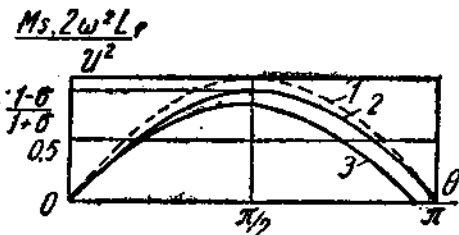


Рис. 207.

показано будет далее, может быть меньше или больше момента, приложенного к валу передатчика, что зависит от скорости вращения системы. В трехфазной системе это зависело от направления вращения передачи по отношению к вращающемуся первичному полю (см. рис. 185 и 187), в однофазной же системе благодаря наличию на статоре

вращающегося, а пульсирующего поля (или двух вращающихся в разные стороны полей) направление вращения не играет роли, а сказывается лишь его скорость.

159. Кривые моментов системы при скорости, близкой к нулю. При пуске в ход или медленном перемещении системы на определенные углы можно положить, что $\omega' = 0$, т. е. $\kappa = 0$.

Тогда выражение (211) примет вид (для передатчика и приемника):

$$M_d = \frac{U^2(1-\sigma)}{2\omega^2 L_1} \cdot \frac{\left(\frac{1+\sigma}{2} - \frac{1-\sigma}{2} \cos \theta\right)^2 \sin \theta + \varepsilon_2^2 \sin \theta}{\left[\left(\frac{1+\sigma}{2}\right)^2 - \left(\frac{1-\sigma}{2}\right)^2 \cos^2 \theta - \varepsilon_2^2\right] + \varepsilon_2^2(1+\sigma)^2}. \quad (214)$$

Следует напомнить, что выражение (211) получено в предположении $\varepsilon_1 = 0$. На рис. 206 изображены кривые моментов системы в функции угла θ для различных значений ε_2 при $\varepsilon_1 = 0$, $k = 0$ и $\sigma = 0,1$. Так, кривая 1 соответствует $\varepsilon_2 = 0,05$; кривая 2 — $\varepsilon_2 = 0,1$; кривая 3 — $\varepsilon_2 = 0,2$ и кривая 4 — $\varepsilon_2 = 0,3$. Как видно из кривых, по мере увеличения активного сопротивления ротора, т. е. увеличения ε_2 моменты уменьшаются, причем для преодоления какого-нибудь определенного тормозящего момента нагрузки в системе с большим ε_2 требуется, как показано на рис. 206, и больший угол θ , т. е. имеет место и большая неточность.

Увеличение рассеяния, т. е. коэффициента σ также дает уплощение кривой моментов. Нужно отметить, что при малых углах θ влияние ε_2 и σ мало сказывается.

Полученные кривые статических моментов справедливы для системы с машинами, имеющими неизменное междужелезное пространство и распределенные обмотки на статоре и роторе.

Для машин с явновыраженными полюсами в первичной системе (рис. 195 и 196) кривая моментов идет круче (пунктирная кривая на рис. 206), чем при неизменном междужелезном пространстве, и поэтому является более выгодной. Системы с машинами по рис. 195 и 196 в силу указанного обстоятельства получили большее распространение. Аналитический подсчет момента системы для последнего случая весьма сложен и недостаточно точен благодаря переменным коэффициентам M и L .

160. Кривые моментов системы при скорости, отличной от нуля. Если в том же выражении для M_{cp} положить $\kappa = 1$ (синхронная скорость), то оно примет вид:

$$M_s = \frac{U^2(1-\sigma)(1+\sigma) \sin \theta - \varepsilon_2(1-\cos \theta)}{2\omega^2 L_1(1+\sigma)^2 + \varepsilon_2^2}. \quad (215)$$

Кривые для различных значений ε_2 и σ представлены на рис. 207. Здесь для кривой 1 имеют место значения $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \sigma = 0$, для кривой 2 — $\varepsilon_2 = 0$ и $\sigma = 0,1$, для кривой 3 — $\varepsilon_2 = 0,1$ и $\sigma = 0,1$. Максимум момента наступает при угле $\theta = \frac{\pi}{2}$, причем величина этого максимума значительно меньше максимумов моментов по рис. 206, что видно из сопоставления масштабов (кривые на всех рисунках построены не непосредственно для момента M_{cp} , а для величины $M_{cp} \cdot \frac{2\omega^2 L_1}{U^2}$, представляющей собой произведение M_{cp} на постоянный коэффициент в выражении для момента).

На рис. 208 дан ряд кривых моментов системы с определенными параметрами $\sigma = 0,1$ и $\varepsilon_2 = 0,05$ для различных скоростей работы в функции угла θ . Здесь кривая 1 построена для $k = \infty$, кривая 2 — $k = 0$ и кри-

вые 3, 4, 5, 6 соответственно для k , равного 0,7; 0,9; 1,3 и 1. Следует отметить, что кривая 2 на рис. 208 является кривой 1 на рис. 206, а кривая 6 — близкой к кривым 2 и 3 на рис. 207 (расположена между ними). Кривые на рис. 208 показывают, что характеристики моментов с увеличением скорости от 0 до синхронной постепенно уплощаются, затем выше синхронной скорости начинают становиться круче. Кривые для $k=0$ и $k=\infty$ (кривые 1 и 2 на рис. 208) довольно близко подходят друг к другу.

При $k=\infty$ выражение для момента примет вид:

$$M_{\infty} = \frac{U^2(1-\sigma)}{2\omega^2 L_1} \cdot \frac{\sin \theta}{\left(\frac{1+\sigma}{2} + \frac{1-\sigma}{2} \cos \theta\right)^2} \quad (216)$$

и становится независимым от ϵ_2 (вторичное индуктивное сопротивление бесконечно велико по сравнению с r_2).

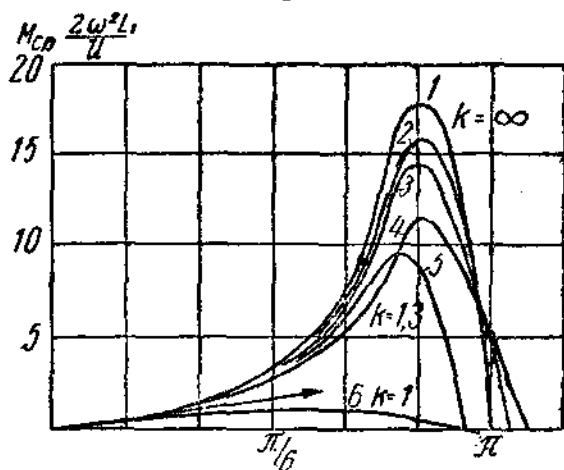


Рис. 208.

Следует отметить, что все кривые имеют почти одинаковую касательную в начале. Действительно,

$$\left(\frac{M_{cp}}{\theta}\right)_{\theta \rightarrow 0} = \frac{U^2(1-\sigma)}{2\omega^2 L_1} \cdot \frac{\sigma^2(1-k^2)^2 + \epsilon_2^2(1+\sigma k^2)}{[\sigma(1-k^2) - \epsilon_2^2]^2 + \epsilon_2^2(1+\sigma)^2} \quad (217)$$

Если пренебречь членами в квадрате, то получим выражение

$$\left(\frac{M_{cp}}{\theta}\right)_{\theta \rightarrow 0} = \frac{U^2(1-\sigma)}{2\omega^2 L_1},$$

которое свидетельствует, что при $\theta \approx 0$ наклон кривых момента, равно как и устойчивость передачи $\left(\frac{dM_{cp}}{d\theta}\right)$, т. е. синхронизирующий момент, не зависят от скорости и активного сопротивления. Увеличение коэффициента рассеяния σ увеличивает угол θ и уменьшает устойчивость.

Максимум момента для большинства кривых наступает при угле $\theta = \frac{5\pi}{6}$.

На рис. 209 даны кривые изменения максимального момента в функции скорости при различных параметрах. При $\varepsilon_2 = 0$ (кривая 1) максимальный момент, равно как и вообще кривая моментов, не зависит от скорости, причем выражение для этого момента равно выражению момента при $k = \infty$ (аналогичные результаты были получены при рассмотрении трехфазных систем — см. рис. 175).

Из кривых 2 и 3 рис. 209 (кривая 2 при $\varepsilon_2 = 0,05$, кривая 3 — $\varepsilon_2 = 0,1$) видно, что при увеличении скорости от нуля максимальный момент уменьшается до наименьшего при синхронной скорости и, затем, при дальнейшем увеличении скорости опять возрастает, асимптотически приближаясь к значению максимального момента при $\varepsilon_2 = 0$ или, что одно и то же, $k = \infty$.

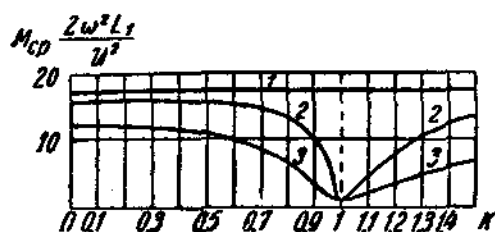


Рис. 209.

Спадение момента при приближении к синхронной скорости происходит тем круче, чем меньше величина ε_2 и в пределе ($\varepsilon_2 = 0$) обе ветви кривой сливаются в одну прямую (характеристика 1), параллельную оси абсцисс. Максимум момента [см. выражение (214)] в этом случае имеет место при $\cos \theta = -\frac{1-\sigma}{1+\sigma}$, а его значение

$$\text{равно: } M_{\max} = \frac{U^2}{4\sigma^{3/2}\omega^2 L_1}. \quad \text{От-}$$

сюда очевидно, что величина его тем больше, чем меньше коэффициент σ , т. е. чем меньше рассеяние (малое насыщение). При скоростях, сильно отличающихся от синхронной, приведенное значение максимального момента практически можно рассматривать как приближенное значение для данной скорости.

Возьмем теперь отношение кажущейся мощности (VA) к мощности, развиваемой на валу приемником. Напишем:

$$\frac{UI_1}{M_{cp}\omega} = \frac{\frac{1+\sigma}{1-\sigma} + \cos \theta}{\sin \theta} \approx \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}, \quad (218)$$

где

$$I_1 = \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{2}{1+\sigma + (1-\sigma) \cos \theta}.$$

а

$$M_{cp} = M_{\infty} = \frac{U^2(1-\sigma)}{2\omega^2 L_1} \cdot \frac{\sin \theta}{\left(\frac{1+\sigma}{2} + \frac{1-\sigma}{2} \cos \theta\right)^2}.$$

Следовательно, отношение кажущейся мощности к мощности на валу возрастает с уменьшением угла θ , т. е. с увеличением точности. Приведенное отношение вместе с тем показывает степень использования передатчика как обычной электрической машины, рассчитываемой на кажущуюся мощность. Например, при допустимом максимальном угле $\theta = 6^\circ$ мы получим $\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \approx 20$, т. е. машина должна быть рассчитана на 20-кратную мощность по сравнению с мощностью, развиваемой ею на валу, которая составляет таким образом всего 5% от расчетной мощности. Однако подобное

весьма плохое использование машины при тех небольших мощностях, которые применяются в большинстве случаев в схемах на однофазном токе, не играет очень существенной роли.

161. Соотношение между мощностями передатчика и приемника и коэффициент полезного действия. Ранее уже было отмечено, что при $\varepsilon_1 = 0$ и $\varepsilon_2 = 0$ момент передатчика равен и противоположен моменту приемника, причем сеть доставляет только намагничивающий ток. Иначе будет обстоять дело при наличии активных сопротивлений.

Пренебрежем попрежнему величиной ε_1 .

Если в выражениях M_{cp} и M'_{cp} положить $k = 0$, т. е. исходить из нулевой скорости, то получим, что $M_{cp} = M'_{cp}$, т. е. то же, что и при $\varepsilon_2 = 0$. Однако в этом случае, как увидим далее, потери будут покрываться мощностью, поступающей из сети в равной мере в обе машины.

Складывая выражения для M_{cp} и M'_{cp} , получим:

$$M_{cp} + M'_{cp} = \frac{U^2(1-\sigma)}{\omega L_1} \varepsilon_2 k(1 - \cos \theta) \cdot \frac{(1-k^2) \left(\frac{1+\sigma}{2} - \frac{1-\sigma}{2} \cos \theta \right)^2 - \varepsilon_2^2}{p^2 + q^2} \quad (219)$$

(значения величин p и q даны выше).

Оказывается, что практически знак суммы $M_{cp} - M'_{cp}$ — такой же, как и знак $(1 - k^2)$, за исключением скоростей, близких к синхронной скорости. Следовательно, для $k \ll 1$, т. е. для скоростей гораздо меньше синхронной, получаем $M_{cp} + M'_{cp} > 0$, откуда видим, что момент M'_{cp} ($M'_{cp} < 0$), который необходимо развить на валу передатчика, чтобы привести его во вращение со скоростью ω' , меньшей ω , будет меньше момента, полученного на валу приемника (за исключением случая $k = 0$, когда оба эти момента равны). Наоборот, для скоростей больше синхронной или равных ей ($k > 1$) абсолютное значение момента передатчика больше момента приемника. Поэтому с точки зрения приводного двигателя системы выгодно работать со скоростями ниже синхронной.

Обратимся теперь к выражению полной электрической мощности P , доставляемой источником первичным цепям системы:

$$P = U(I_1 \cos \varphi_1 + I_1' \cos \varphi_1') = \frac{U^2}{\omega L_1} \frac{p(x_1 + x_1') + q(y_1 + y_1')}{p^2 + q^2}$$

или, сделав все сокращения, заменив множители числителя их выражениями (208), получим:

$$P = \frac{U^2(1-\sigma)}{\omega L_1} \varepsilon_2 (1 - \cos \theta) \cdot \frac{\varepsilon_2^2 + (1-k^2) \left(\frac{1+\sigma}{2} - \frac{1-\sigma}{2} \cos \theta \right)^2}{p^2 + q^2} \quad (220)$$

Оказывается, что за исключением скоростей, превосходящих синхронную, P имеет одинаковый знак с $(1 - k^2)$. Следовательно, для k меньше 1 величина P будет положительна, т. е. сеть доставляет энергию системе, причем часть этой энергии передается валу приемника, момент которого, как уже отмечалось, больше момента передатчика.

Ранее было указано (рис. 202), что в этом случае $\cos \varphi_1 > 0$ и $\cos \varphi_1' > 0$, что соответствует потреблению электрической энергии как передатчиком, так и приемником. (Система работает по отношению к обратно-синхронному полю в режиме тормоза, а по отношению к син-

хронному полю в режиме двигателя; разница между мощностями этих режимов покрывается приводным двигателем.)

Если величина k больше единицы, то P будет отрицательным, и система передатчик-приемник отсылает электрическую энергию в сеть. Это подтверждается и кривыми рис. 202, где для этого случая $\cos \varphi_1 < 0$ и $\cos \varphi'_1 < 0$.

Указанная энергия доставляется приводным двигателем системы, который кроме того развивает мощность на валу приемника и покрывает потери. Этим объясняется, что момент передатчика превосходит момент приемника. Следует заметить, что в этом случае система работает по отношению к обратно-синхронному полю в режиме тормоза, а по отношению к синхронному полю в режиме генератора.

Для $k = 1$ P оказывается положительной, система поглощает энергию. Однако из рис. 202 видно, что в этом случае $\cos \varphi_1 < 0$ и $\cos \varphi'_1 > 0$, т. е. часть энергии, поглощенной передатчиком, отсылается приемником в питающую сеть. Разница частично компенсирует потери, которые покрываются за счет большего момента передатчика по сравнению с моментом приемника.

В общем, в силу закона сохранения энергии во всех случаях должно иметь место равенство:

$$P = (M_{cp} - M'_{cp}) \omega' + Q = (M_{cp} - M'_{cp}) \omega k + Q,$$

где Q — потери в системе, которые мы приняли равными тепловым потерям во вторичной цепи.

Таким образом при абсолютном значении $M_{cp} > M'_{cp}$ величина P получается положительной, т. е. энергия поступает из сети. Наоборот, при $M'_{cp} > M_{cp}$ и $(M'_{cp} - M_{cp}) \omega \cdot k > Q$ мощность отдается в сеть. Следовательно, в зависимости от скорости мощность P является „положительным или отрицательным добавлением“ к мощности, доставляемой приводным двигателем системы.

Электрический коэффициент полезного действия приемника может быть высчитан для некоторой скорости следующим образом:

$$\eta = \frac{M_{cp} \cdot \omega \cdot k}{M_{cp} \cdot \omega \cdot k + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2} = \frac{1}{1 + \frac{r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2}{M_{cp} \cdot \omega \cdot k}} = \frac{1}{1 + y}. \quad (221)$$

Величину

$$y = \frac{r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2}{M_{cp} \cdot \omega \cdot k}$$

можно считать примерно равной

$$y = \frac{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 (1 - \cos \theta)}{k \cdot \sin \theta}.$$

Чем меньше величина y , тем больше к. п. д. Следовательно, для $\frac{dy}{d\theta} = 0$ необходимо, чтобы имело место соотношение

$$\cos \theta = \frac{\varepsilon_2}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2};$$

соответствующее при этом значение

$$y = \frac{2}{k} \cdot \sqrt{\varepsilon_1 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}.$$

Так как угол θ положителен, то максимум к. п. д. будет иметь место при углах θ , меньших $\frac{\pi}{2}$. Поэтому выгоднее работать с углами, меньшими, чем $\theta = \frac{\pi}{2}$.

Коэффициент полезного действия возрастает с увеличением скорости работы. Однако далеко в этом отношении идти нельзя, так как при синхронной скорости снижаются рабочий момент и устойчивость работы.

На рис. 210 представлены кривые к. п. д. в функции угла θ для двух скоростей: 1) $k = 0,5$ и 2) $k = 0,1$. При большей скорости кривая к. п. д. оказывается расположенной значительно выше (параметры системы для кривых на рис. 210: $\sigma = 0,1$; $\varepsilon_2 = 0,05 = 2\varepsilon_1$). Следует отметить, что из последнего выражения для η видно, что большее влияние на к. п. д. оказывает величина ε_1 .

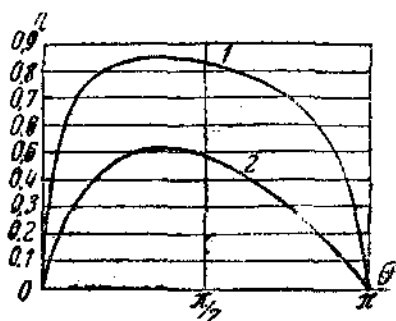


Рис. 210.

162. Случай нескольких приемников, работающих от одного передатчика.

На один передатчик могут быть включены несколько приемников. Если предположить, что все, например, n приемников сдвинуты на один и тот же угол θ относительно передатчика, то во всех приемниках будут проходить одинаковые токи, суммирующиеся в обмотках передатчика. Поэтому передатчик должен быть рассчитан на в n раз большую кажущуюся мощность, чем приемник, благодаря чему его параметры должны иметь значение:

$$L_1' = \frac{L_1}{n};$$

$$r_1' = \frac{r_1}{n};$$

$$g_2' = \frac{g_2}{n};$$

$$r_2' = \frac{r_2}{n} \text{ и } M' = \frac{M}{n}.$$

Посмотрим теперь, как влияет на работу системы изменение числа присоединенных к передатчику приемников. Допустим, что к передатчику, рассчитанному на n приемников, присоединены всего лишь m приемников.

Случай неодинаковой мощности передатчика и приемника, к которому принадлежит и данный вопрос, нами уже освещался при разборе трехфазной системы, причем было установлено, что с увеличением мощности передатчика максимальный момент приемника увеличивается благодаря уменьшению общего сопротивления всей цепи системы.

В данном случае имеет место такое же соотношение, так как при отключении части приемников относительная разность мощностей передатчика и суммы оставшихся приемников при этом возрастает.

Учитывая, что при m приемниках токи в них остаются такими же и что токи передатчика в m раз больше, в частности вторичный ток $i'_2 = m i_2$, получим общие выражения э. д. с. системы в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - e_1 &= u; \\ \frac{r_1}{n} i'_1 + \frac{L_1}{n} \frac{di'_1}{dt} - e'_1 &= u; \\ r_2 \left(1 + \frac{m}{n}\right) i_2 - L_2 \left(1 + \frac{m}{n}\right) \frac{di_2}{dt} - e_2 + e'_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (222)$$

Полагая, что активные сопротивления весьма незначительны по отношению к реактансам, находим после соответственных преобразований:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_1 &= -j \frac{U}{\omega L_1} \left(1 + \frac{n}{m}\right) \cdot \frac{1 + \frac{m}{n} \sigma - (1 - \sigma) \cos \theta}{\left(1 + \frac{n}{m} \sigma\right) \left(1 + \frac{m}{n} \sigma\right) - (1 - \sigma)^2 \cos^2 \theta}; \\ \bar{I}'_1 &= -j p \frac{U}{\omega L_1} \left(1 + \frac{n}{m}\right) \cdot \frac{1 + \frac{n}{m} \sigma - (1 - \sigma) \cos \theta}{\left(1 + \frac{m}{n} \sigma\right) \left(1 + \frac{n}{m} \sigma\right) - (1 - \sigma)^2 \cos^2 \theta}; \\ \bar{I}_2' - \bar{I}_2'' &= \tau_2 \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{\left[1 + \frac{n}{m} \sigma - (1 - \sigma) \cos \theta\right] \sin \theta}{\left(1 + \frac{n}{m} \sigma\right) \left(1 + \frac{m}{n} \sigma\right) - (1 - \sigma)^2 \cos^2 \theta}; \end{aligned} \right\} \quad (223)$$

$$\begin{aligned} M_{cp} &= \frac{3M}{2} [\bar{I}_1] [\bar{I}_2' - \bar{I}_2''] = \\ &= (1 - \sigma) \left(1 + \frac{n}{m}\right) \frac{U^2}{\omega^2 L_1} \cdot \frac{\left[1 + \frac{m}{n} \sigma - (1 - \sigma) \cos \theta\right]}{\left[\left(1 + \frac{n}{m} \sigma\right) \left(1 + \frac{m}{n} \sigma\right) - (1 - \sigma)^2 \cos^2 \theta\right]^2} \times \\ &\times \left[1 + \frac{n}{m} \sigma - (1 - \sigma) \cos \theta\right] \sin \theta. \end{aligned} \quad (224)$$

С другой стороны, для $m = n$ имеем

$$\bar{I}_1 = -2j \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{1 + \sigma - (1 - \sigma) \cos \theta}{(1 + \sigma)^2 - (1 - \sigma)^2 \cos^2 \theta} = 2j \frac{U}{\omega L_1} \frac{1}{[1 + \sigma + (1 - \sigma) \cos \theta]}, \quad (225)$$

$$\bar{I}'_1 = n \bar{I}_1.$$

$$M_{cp} = \frac{U^2 (1 - \sigma)}{2\omega^2 L_1} \cdot \frac{\sin \theta}{\left[1 + \frac{\sigma}{2} + \left(\frac{1 - \sigma}{2}\right) \cos \theta\right]^2}. \quad (226)$$

Из сопоставления выражений момента для $m < n$ и $m = n$ видно, что для одного и того же угла θ момент одного приемника возрастает с уменьшением числа приемников, присоединенных к одному и тому же передатчику, рассчитанному на n приемников. Отношение моментов при переходе от n приемников к m приемникам для небольших углов θ приближается

к значению $\frac{2n}{m+n}$. В частности, в случае двух приемников, момент для углов θ , меньших $\frac{3\pi}{4}$, увеличивается приблизительно на 30% при отключении одного из приемников. На рис. 211 даны кривые моментов в случае двух приемников (кривая 2) и одного (кривая 1), присоединенного к передатчику, рассчитанному на два приемника (здесь положено $\sigma = 0,1$; $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$).

Теперь надлежит вкратце рассмотреть вопрос о влиянии числа приемников на устойчивость системы.

Если при n включенных приемниках, сдвинутых относительно передатчика на одинаковый угол θ , один из приемников сдвинуть на несколько другой угол путем изменения рабочего момента на его валу, то синхронизирующий момент для этого приемника будет обусловлен как взаимодействием передатчика с этим приемником, так и взаимодействием с ним других приемников, которые являются для него в этом случае как бы также передатчиками или приемниками. Следовательно, можно сказать, что устойчивость работы отдельного приемника (т. е. величина синхронизирующего момента) вообще увеличивается с числом приемников, работающих параллельно. Однако возможен и другой случай, когда один из приемников сдвигается по каким-либо причинам на большой угол, например случайно затормаживается. Тогда система получает как бы два передатчика (нормальный передатчик и один заторможенный приемник), что может повлечь за собой общее уменьшение устойчивости системы.

Пусть $n-1$ присоединенных к передатчику приемников сдвинуты относительно него на одинаковый угол θ , тогда как один приемник оказывается сдвинутым на угол θ_0 относительно других приемников, т. е. на угол $(\theta - \theta_0)$ относительно передатчика (знак у угла θ_0 может быть положительный или отрицательный).

Устойчивость последнего приемника будет характеризоваться величиной синхронизирующего момента, который равен $\frac{dM_0}{d\theta_0}$. Присвоив индекс „0“ всем величинам рассматриваемого приемника, можем для системы написать следующие общие выражения для э. д. с. Пренебрегая r_1 и r_2 , имеем:

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} - e_1 &= u; \quad L_1 \frac{di_{10}}{dt} - e_{10} = u; \\ L_1 \frac{di_1'}{dt} - ne_1' &= nu; \\ (2n-1) \frac{di_2}{dt} + \frac{di_{20}}{dt} + \frac{n}{x_2} (e_2' - e_2) &= 0; \\ \frac{di_2}{dt} - \frac{di_{20}}{dt} + \frac{1}{x_2} (e_{20} - e_2) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (227)$$

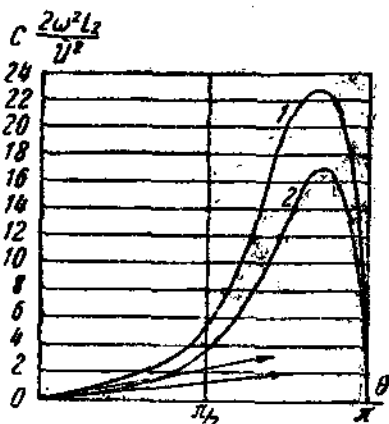


Рис. 211.

Тем же порядком, что и ранее (§ 156), находим следующие соотношения между первичными и вторичными токами:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_2' + \bar{I}_2'' &= \frac{\tau_2}{2n} [\bar{I}_{10} \cos \theta_0 + \bar{I}_1' \cos \theta - (n+1) \bar{I}_1]; \\ \bar{I}_{20}' + \bar{I}_{20}'' &= -\frac{\tau_2}{2n} [(2n-1) \bar{I}_{10} \cos \theta_0 - \bar{I}_1' \cos \theta - (n-1) \bar{I}_1]; \\ \dot{I}_2'' - \dot{I}_2' &= -j \frac{\tau_2}{2n} (\dot{I}_{10} \sin \theta_0 + \dot{I}_1' \sin \theta); \\ \dot{I}_{20}'' - \dot{I}_{20}' &= j \frac{\tau_2}{2n} [(2n-1) \dot{I}_{10} \sin \theta_0 - \dot{I}_1' \sin \theta]. \end{aligned} \right\} \quad (228)$$

Для первичных токов:

$$\left. \begin{aligned} [n-1 + (n+1)\sigma] \dot{I}_1 + (1-\sigma) \dot{I}_{10} \cos \theta_0 + \\ + (1-\sigma) \dot{I}_1' \cos \theta &= -2nj \frac{U}{\omega L_1}; \\ (n-1)(1-\sigma) \dot{I}_1 \cos \theta_0 + [1 + \sigma(2n-1)] \dot{I}_{10} + \\ + (1-\sigma) \dot{I}_1' \cos (\theta - \theta_0) &= -2nj \frac{U}{\omega L_1}; \\ (n-1)(1-\sigma) \dot{I}_1 \cos \theta + (1-\sigma) \dot{I}_{10} \cos (\theta - \theta_0) + \\ + (1-\sigma) \dot{I}_1' &= -2nj \frac{U}{\omega L_1}. \end{aligned} \right\} \quad (229)$$

Решение этой системы трех уравнений с тремя неизвестными дает значения токов $\dot{I}_1$, $\dot{I}_{10}$, $\dot{I}_1'$ в зависимости от углов θ и θ_0 . После этого из системы уравнений (228) получаем значения $\bar{I}_2'' - \bar{I}_2'$ и $\bar{I}_{20}'' - \bar{I}_{20}'$, что дает возможность определить моменты для каждого из $n-1$ приемников:

$$M_{cp} = \frac{3M}{2} [\bar{I}_1] \times [\bar{I}_2'' - \bar{I}_2']$$

и для одного приемника, сдвинутого на угол $\theta - \theta_0$:

$$M_0 = \frac{3M}{2} [\bar{I}_{10}] \times [\bar{I}_0],$$

где

$$\dot{I}_0 = (\dot{I}_{20}'' - \dot{I}_{20}') \cos \theta_0 + j (\dot{I}_{20}' + \dot{I}_{20}'') \sin \theta_0.$$

Определим значение синхронизирующего момента $\frac{dM_0}{d\theta_0}$ в наиболее простом случае, когда углы θ для $n-1$ приемников равны нулю, т. е. для положения равновесия, соответствующего нулевому моменту. Так как угол θ_0 стремится к нулю, то заменим $\cos \theta_0$ через 1 и $\sin \theta$ через θ_0 . Уравнения (229) примут тогда следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} [(n-1) + (n+1)\sigma] \dot{I}_1 + (1-\sigma) \dot{I}_{10} + (1-\sigma) \dot{I}_1' &= -2nj \frac{U}{\omega L_1}; \\ (n-1)(1-\sigma) \dot{I}_1 + [1 + \sigma(2n-1)] \dot{I}_{10} + (1-\sigma) \dot{I}_1' &= -2nj \frac{U}{\omega L_1}; \\ (n-1)(1-\sigma) \dot{I}_1 + (1-\sigma) \dot{I}_{10} + (1-\sigma) \dot{I}_1' &= -2nj \frac{U}{\omega L_1}. \end{aligned} \right\} \quad (230)$$

откуда находим:

$$I_{10} = I_1 = \frac{I_1'}{n} = -j \frac{U}{\omega L_1}$$

и, следовательно,

$$I_{20}'' - I_{20}' = -\frac{\tau_2}{\omega L_1} \cdot \frac{2n-1}{2n} \theta_0 U;$$

$$M_0 = \frac{3M}{2} \cdot \frac{U^2}{\omega L_1} \cdot \frac{\tau_2}{\omega L_1} \cdot \frac{2n-1}{2n} \theta_0 = (1-\sigma) \frac{U}{\omega^2 L_1} \cdot \frac{2n-1}{2n} \theta_0, \quad (231)$$

т. е.

$$\left(\frac{M_0}{\theta}\right)_{\theta \rightarrow 0} = (1-\sigma) \frac{U}{\omega L_1} \cdot \frac{2n-1}{2n}. \quad (232)$$

Если бы к передатчику был присоединен только один приемник, то по формуле (224) для M_{cp} положив $m=1$, имели бы:

$$\left(\frac{M_0}{\theta}\right)_{\theta \rightarrow 0} = (1-\sigma) (1+n) \frac{U^2}{\omega^2 L_1} \cdot \frac{\sigma^2 \left(1 + \frac{1}{n}\right) (1+n)}{\sigma^2 \left(n + \frac{1}{n} + 2\right)^2} =$$

$$= (1-\sigma) \frac{U^2}{\omega^2 L_1} \cdot \frac{n}{n+1}. \quad (233)$$

Сравнивая выражения (232) и (233), получим:

$$\frac{2n-1}{2n} > \frac{n}{n+1}. \quad (234)$$

Следовательно, устойчивость приемника, соединенного с передатчиком, увеличивается при увеличении числа приемников, присоединенных параллельно к одному и тому же передатчику. (Следует заметить, что это соотношение справедливо, если передатчик рассчитан на n приемников, причем число присоединяемых приемников не превосходит указанного числа n).

Выше мы предполагали, что полное сопротивление передатчика в n раз меньше сопротивления приемников. Если теперь вернуться к первоначальной схеме и положить, что один приемник присоединен к передатчику, одинаковому с ним по мощности, то степень устойчивости в тех же условиях получается, полагая $n=1$ в приведенном выше соотношении, для

$$\left(\frac{M_0}{\theta}\right)_{\theta \rightarrow 0}$$

в следующем виде:

$$(1-\sigma) \frac{U^2}{\omega^2 L_1} \cdot \frac{1}{2}.$$

Сравнивая выражения для $\left(\frac{M_0}{\theta}\right)_{\theta \rightarrow 0}$ в обоих случаях, получим соотношение:

$$\frac{n}{n+1} > \frac{1}{2},$$

которое подтверждает ранее высказанное положение, что устойчивость увеличивается при увеличении мощности передатчика по отношению к мощности приемника.

Интересно также отметить влияние на работу системы большой разницы углов θ между приемниками.

Для простоты возьмем два приемника, включенных на один передатчик, и допустим наличие предельного случая (сдвиг между приемниками в 180°).

Для получения уравнения для этого частного случая надлежит в общие выражения (230) подставить частные значения $n = 2$ и $\theta_0 = 180^\circ$.

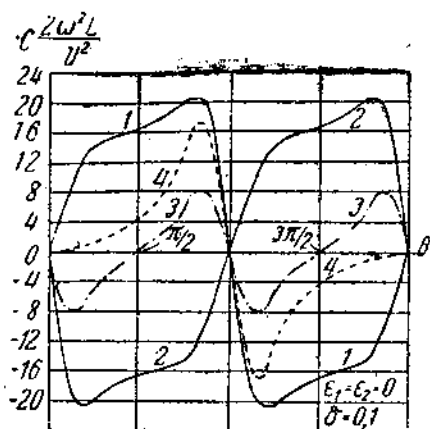


Рис. 2.2.

Из рис. 2.2 видно, что моменты у приемников имеют противоположные знаки, благодаря чему результирующий момент передатчика сильно уменьшается. При $\theta = 0$ одного из приемников система находится в положении неустойчивого равновесия, небольшое отклонение от которого вызывает в приемниках значительные моменты противоположных знаков, стремящихся вращать ротор приемников в противоположных направлениях до совпадения их осей ($\theta_0 = 0$). Таким образом система и при нескольких приемниках обладает свойством самосинхронизации, которое играет существенную роль при работе системы в пределах одного оборота.

ГЛАВА XXVI.

ПРИМЕНЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМ НА ОДНОФАЗНОМ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ С ИНДУКЦИОННЫМИ МАШИНАМИ.

163. Введение. Системы на однофазном переменном токе с синхронными машинами могут применяться в основном для двух целей: передача указаний на расстояние и передача для непосредственного управления рабочими деталями.

По существу нельзя провести резкой грани между этими областями применения, так как в связи с введением в схемы управления на расстоянии ионно-электронных приборов и фотоэлементов режим работы приемника при управлении рабочими деталями часто сводится к режиму работы при передаче указаний.

Вообще же различие между этими двумя областями заключается, во-первых, в величинах рабочего момента (степени энергетического использования машин), а следовательно в величинах угла θ , и во-вторых — в способе соединения с исполнительным механизмом.

164. Передача указаний. В этом случае исполнительным механизмом, которым управляет синхронная передача, является стрелка, почти не дающая никакой нагрузки на вал приемника (в особенности уравновешенная стрелка). Поэтому система работает при передаче указаний почти на нулевом рабочем моменте (холостой ход системы) и при весьма малом угле θ . В указанных условиях, как было выяснено выше, величина угла θ и работа системы не зависят от скорости передачи и в значительной степени от параметров машины (см. рис. 206 и 208). Поэтому параметры машины подбираются из соображений максимального допустимого тока при включении системы, когда приемники находятся в любых положениях, например сдвинуты на 180° . Так как нормальный первичный ток мало отличается от тока холостого хода $I_{10} = \frac{U}{\omega L_1}$, то отношение максимального тока к нормальному будет

равно $\frac{1}{\varepsilon_2}$ (в случае одного приемника). Если, например, желательно, чтобы максимальный ток не был более двукратного нормального, то ε_2 в этом случае должно быть равно 0,5. В этих условиях формула для момента при нулевой скорости показывает, что максимальный момент приблизительно в 25 раз больше нормального. При синхронной скорости максимальный момент оказывается в 11 раз больше нормального. Следовательно, при всех скоростях имеет место надежная гарантия от выпадения из синхронизма. Для повышения устойчивости, как это следует из § 160, надлежит брать небольшим, т. е. делать машину ненасыщенной.

Очевидно, что кажущаяся мощность, на которую рассчитываются машины системы, будет значительно больше механической мощности, развиваемой приемником на своем валу. Надежность работы при передаче указаний требует, чтобы одному положению стрелки передатчика соответствовало лишь одно положение стрелки приемника, что выдвигает требования непосредственной насадки стрелок на вал машин и выполнения последних двухшосными. При таких условиях система получается самосинхронизирующейся и не требует согласования стрелок, так как при включении в сеть все стрелки приемников приходят в совпадение со стрелкой передатчика.

При выпадении во время работы по тем или иным обстоятельствам какого-нибудь приемника из синхронизма не следует опасаться расстройств системы, потому что впадение его в синхронизм вновь возможно лишь в положении, в котором он находился бы, если бы продолжал работать правильно.

165. Передача для управления рабочими деталями. В этом случае рабочий момент значительно больше, благодаря чему приходится допускать углы θ большей величины, чем в первом случае. Иначе пришлось бы чрезмерно увеличивать размеры машины. Установленное выше соотношение

$$\frac{UI_1}{M_{cp} \omega'} \approx \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}$$

требует, чтобы не было большой разницы между UI_1 и $M_{cp} \omega'$, применение значительных углов θ . Чрезмерному их увеличению препятствует повышение джоулевых потерь и уменьшение электрического к. п. д. (см. рис. 210). Поэтому оптимальным в большинстве случаев оказывается угол $\theta = \frac{\pi}{2}$.

При углах этого порядка точность перестает быть независимой от скорости (см. рис. 208). Поэтому необходимо взять ε_1 и ε_2 небольшими, тем более если желательно работать около синхронной скорости. Пределом уменьшения величин ε_1 и ε_2 является максимальный допустимый ток при включении системы.

Рассмотрение электрических и механических характеристик, построенных, например, для $\sigma = 0,1$, $\varepsilon = 0,05$ и $\varepsilon_1 = 0$ (рис. 201, 202, 206, 208), показывает, что в случае расчета машины так, чтобы номинальному моменту при малых скоростях соответствовал угол $\theta = \frac{2\pi}{3}$, при пуске можно получить максимальный момент в 2,5 раза больший нормального, причем выпадение из синхронизма при нормальном моменте наступает только для скорости, составляющей 0,9 от синхронной. Максимальная сила тока, могущая иметь место при включении, в 3 раза больше нормального тока (случай передатчика с одним приемником).

Очевидно, что при угле $\theta \approx \frac{\pi}{2}$ необходимо применять между валами приемника и исполнительного механизма передачу, уменьшающую скорость, но увеличивающую точность работы, повышению же скорости работы синхронной передачи препятствует невозможность перехода через синхронную скорость.

Таким образом при заданной скорости работы исполнительного механизма (например скорость наводки орудия), предельной допустимой скорости синхронной передачи и некотором угле θ получается определенная точность работы.

Пусть, например, имеет место случай управления орудийной башней при помощи рассматриваемой системы. (Это управление обычно производится через серводвигатель или приводной двигатель, управляемые от синхронной передачи, но здесь мы для простоты опускаем промежуточные звенья и будем рассматривать как бы непосредственное управление.)

Максимальная скорость наводки задана равной 6° в сек. (1 об/мин). Сеть переменного тока для питания синхронной передачи имеет частоту 50 Hz. Если мы предположим, что максимальная скорость передачи ограничена скоростью, составляющей 0,9 от синхронной скорости, то в нашем распоряжении для двухполюсного приемника имеется максимальная скорость, равная $0,9 \times 60 \times 50 = 2700$ об/мин. Отношение числа оборотов башни и передачи должно, следовательно, составить $1/2700$.

Угол θ уменьшается в таком же отношении. При $\theta = \frac{2\pi}{3}$ в системе точность наводки составит, следовательно, в радианах $\frac{2\pi}{3 \times 2700}$, а в минутах $\frac{360 \times 60}{3 \times 2700} = 2,7'$.

Отметим, что увеличение числа полюсов приемника (уменьшение угла θ) ничего не изменит в конечной точности, так как одновременно придется снизить число оборотов системы.

В общем для увеличения точности при определенной минимальной скорости исполнительного механизма существуют только два способа. Первый это — уменьшение угла θ при той же скорости передачи за счет применения в синхронной передаче машин большей мощности, например, номинальной мощности в два раза больше передаваемой мощности. Тогда

из известного выражения получим $\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = 2$, откуда θ (в радианах) $= 0,94$, и точность работы для нашего примера получится: $\frac{60 \times 360 \times 0,94}{2700 \times 2\pi} = 1,2'$.

По второму способу можно повысить частоту питающего тока, причем одновременно нужно повысить и напряжение, как показывает выражение для момента, если желательно сохранить тот же угол θ (см. также гл. XX). Эти обстоятельства вызовут увеличение потерь в железе, т. е. в конечном счете обусловят опять-таки увеличение размеров машины.

166. Работа системы с селективным действием. Благодаря наличию самосинхронизации в системе возможно избирательное действие отдельных приемников или отдельных групп их от одного или нескольких передатчиков.

Указанное избирательное действие может осуществляться через соответствующее избирательное приспособление (селектор), например выключатель, установленный у передатчика. При включении приемника, находящегося в любом положении, на передатчик при помощи селектора проис-

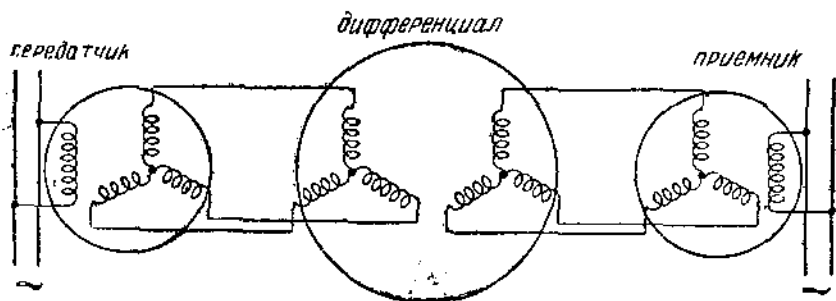


Рис. 213.

ходит автоматическое впадение в синхронизм приемника, благодаря чему система приводится в действие простой установкой селектора без какого-либо предварительного согласования осей. Очевидно, что приключаться подобным образом на передатчик могут не только отдельные приемники, но и группы их. Подобные схемы с селекторами находят применение, например, в промышленной диспетчеризации для производства периодического контроля за протеканием ряда различных процессов.

167. Дифференциальная синхронная передача. Так же, как и в трехфазной системе (рис. 193), между передатчиком и приемником возможно включение одного или нескольких электрических дифференциалов, выполненных по типу трехфазной асинхронной машины с кольцами (рис. 213). Эта система может быть также названа последовательной системой как по схеме включения, так и по характеру действия, представляющего собой последовательное сложение перемещений нескольких друг за другом включенных передатчиков. Вследствие отсутствия непосредственного соединения между дифференциалом и источником возбуждения дифференциал получает возбуждение через одну или обе машины, с которыми он соединен. Обыкновенно возбуждение подводится только к обмотке статора. Поэтому машина, соединенная со статором дифференциала и подводящая это возбуждение, должна быть рассчитана так, чтобы выдержать без перегрева наличие дополнительной мощности на возбуждение. Часто применяют ма-

шину специального выполнения, обычно называемую возбудителем самосинхронизирующегося типа. Она может действовать в системе и в качестве передатчика и в качестве приемника. Иногда же в более сложных системах имеет место специальный возбудитель, работающий вхолостую.

Действие дифференциала подобно действию обычной машины в схеме синхронной связи.

Направление вращения приемной части системы может быть изменено по желанию посредством пересоединения любой пары проводов на роторе или статоре дифференциального прибора.

Наличие дифференциала дает возможность осуществить привод приемника от двух отдельных постов, причем если угол вращения передатчиков ограничен, то имеет место самосинхронизирующееся устройство. Самосинхронизирующуюся систему такого рода можно применять в весьма большом числе соединений задающих и принимающих приборов. С большим успехом могут быть применены такие системы, где, например, три дифференциальных самосинхронизирующихся элемента последовательно включены между задающим прибором и принимающими приборами. В этих сложных системах возбудители обычно разгружаются от тока возбуждения при помощи статических магазинных емкости, присоединенных к обмоткам статора дифференциала. Указанные емкости рассчитаны на ток, равный току возбуждения дифференциала. Таким образом машина нагружается только ваттной составляющей тока возбуждения, которая, как правило, составляет менее $\frac{1}{3}$ общего тока возбуждения.

168. Влияние сопротивлений соединительной линии. В большинстве случаев, когда расстояние между передатчиком и приемником мало, можно пренебречь полным сопротивлением линии.

При наличии длинных линий сопротивление их, сравнимое с величиной сопротивления вторичных обмоток машин, уменьшает величину нормального момента, которая может быть получена от системы. Поэтому в системах с длинной линией сопротивление соединительных проводов берется по возможности малым, а машины применяются со вторичной обмоткой с большим значением полного сопротивления, что достигается повышением вторичного напряжения (большое число витков). Следовательно, в этом случае оказывается более удобной система с машинами, имеющими вторичную обмотку на статоре, что позволяет применять (с точки зрения изоляции и т. п.) большие напряжения, чем при расположении ее на роторе. Примерные характеристики момента в функции сопротивления линии для различных значений полного сопротивления вторичной обмотки (т. е. различных вторичных напряжений, например 220 и 110 V) показаны на рис. 214. Еще лучшие результаты можно получить путем применения между вторичными обмотками и линией трансформаторов, повышающих напряжение в последней.

Все машины системы должны получать питание от одного и того же источника переменного напряжения и при многофазной сети от одной и той же фазы. В некоторых случаях приходится проводить специальные линии однофазного переменного тока к установленным на расстоянии приемникам. Если эти линии длинны, то их сопротивление будет велико и в них получается не только большое падение напряжения, но также смещение по фазе питающего приемники тока относительно тока передатчиков.

Уменьшение напряжения вызывает (в квадрате) уменьшение момента передатчиков, а смещение по фазе может вызвать опасные уравнивающие

токи и снижение точности передачи. Для устранения первого обстоятельства применяют небольшой автотрансформатор, включаемый в линию с целью компенсации падения напряжения (рис. 215). Сдвиг по фазе может быть учтен только посредством включения некоторого компенсирующего сопротивления в первичную цепь приемника или передатчика.

169. Использование земли в качестве соединительного провода. В обычной системе на однофазном токе между дающим и принимающим приборами необходимо иметь пять проводов. Если сопротивление этих проводов мало, то можно иметь на один провод меньше, используя один из них как общее соединение для статора и ротора. При большой величине сопротивления это влияет на точность работы системы. Предлагалось также применять землю как один из соединительных проводов для вторичных обмоток. Однако этого рекомендовать нельзя, так как сопротивление заземления вообще может меняться довольно значительно, создавая неравенство сопротивлений отдельных фаз, которое обусловит в той или иной степени нарушение правильной работы системы.

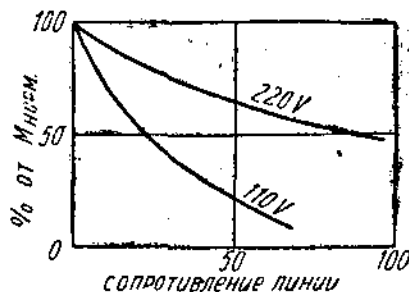


Рис. 214.

170. Использование телефонного кабеля для соединений. Использование проводников телефонного кабеля вполне возможно для схем синхронной связи. Однако необходимо при этом соблюдать некоторые условия относительно помех от шумов, допустимого напряжения, величины

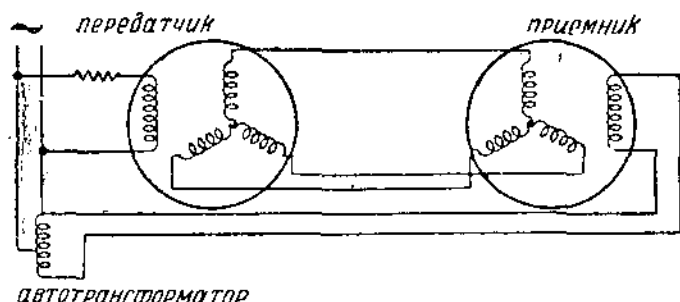


Рис. 215.

тока и требуемой изоляции. Обыкновенно необходимы фильтры между источником питания и приборами системы. Они должны быть рассчитаны так, чтобы на их зажимах не особенно увеличивалось напряжение в случае разомкнутой цепи и чтобы получить снижение не менее чем на 90% всех гармоник свыше 300 периодов при прохождении через фильтр. Заземление в цепи, электрически соединенной с телефонными проводами, недопустимо. Во избежание возникновения высокого напряжения (приблизительно до 3000 В) на телефонных проводах приходится ставить предохранительные трансформаторы. Рабочее напряжение и ток не должны превышать соответственно 120 В и 350 мА.

171. Влияние линий сильного тока. Там, где соединительная линия синхронной связи идет близко и параллельно линиям сильного тока, необходимо уничтожить индуктивные помехи. В некоторых случаях для устранения электростатических напряжений рекомендуется заземлять все три соединения вторичных обмоток системы посредством высоких сопротивлений (порядка в 1000 Ω), соединяемых в звезду с заземленной нулевой точкой.

172. Пример применения дифференциальной системы синхронной связи на однофазном токе. На рис. 216 изображена схема синхронной связи с дифференциалом для поддержания постоянства числа оборотов двигателя постоянного тока при заданном режиме, вновь разработанная (1933 г.) фирмой GEC для бумажных машин с одиночным приводом отдельных механизмов.

Регулирование числа оборотов приводных двигателей постоянного тока для бумажной машины должно производиться в весьма широких пределах как путем изменения напряжения на их зажимах, так и изменения тока возбуждения.

Для этого указанные двигатели питаются от специального генератора постоянного тока, напряжение которого снижается при регулировании вниз до 0,1 от нормального его значения и даже ниже.

При этом нагрузка на двигатели при любых скоростях может колебаться в пределах от 25 до 150% нормальной нагрузки. Вместе с тем на каждой установленной ступени скорости число оборотов приводных двигателей должно быть постоянным при колебаниях нагрузки в указанных пределах. Наиболее подходящей системой регулирования оказалась схема синхронной связи с однофазными индукционными машинами („Selsyn“). На рис. 216 представлена схема для регулирования работы двигателя 12, служащего для привода отдельного механизма бумажной машины и приключенного на шины главного генератора с меняющимся напряжением. Обмотка возбуждения указанного двигателя включена в отдельную цепь постоянного тока, в которой величина последнего может регулироваться. Параллельно двигателю 12 приключен вспомогательный двигатель 2, служащий для привода главной машины 1 системы синхронной связи, обслуживающей схемы регулирования ряда приводных двигателей, подобных двигателю 12. Машина 1 представляет собой обычную машину для разбираемой системы синхронной связи с однофазной первичной обмоткой и трехфазной вторичной. Последняя приключена к зажимам одной из обмоток электрического дифференциала 3, другая обмотка которого приключена ко вторичной обмотке второго передатчика 5, приводимого во вращение через регулируемую передачу 10, 11 от двигателя 12. Если машины 1 и 5 вращаются с одинаковой скоростью, то дифференциал 3 неподвижен (подобно двигателю двойного питания в схеме по рис. 167). Если же машина 5 вращается со скоростью, отличной от скорости машины 1, то дифференциал вращается за счет разности скоростей указанных машин и приводит в действие регулятор 4, который при помощи двуплечего рычага воздействует на сопротивление реостата 14 (например с угольным столбом), включенного в цепь возбуждения двигателя 12, заставляя последний изменить соответственно число оборотов. При изменении напряжения на зажимах главного генератора или на зажимах общей цепи возбуждения двигателей число оборотов двигателей 2 и 12 меняется, причем точное соотношение чисел оборотов указанных двигателей на новой ступени скорости опять-таки подрегуливается при помощи дифференциальной системы синхронной

связи. Определенное соотношение между оборотами двигателя 2 и двигателя 12 устанавливается при помощи регулируемой передачи 10 и 11 с передвижным ремнем 9.

Очевидно, что при любом соотношении оборотов двигателей 2 и 12 работа дифференциала продолжается до тех пор, пока числа оборотов машин 1 и 5 не сравняются.

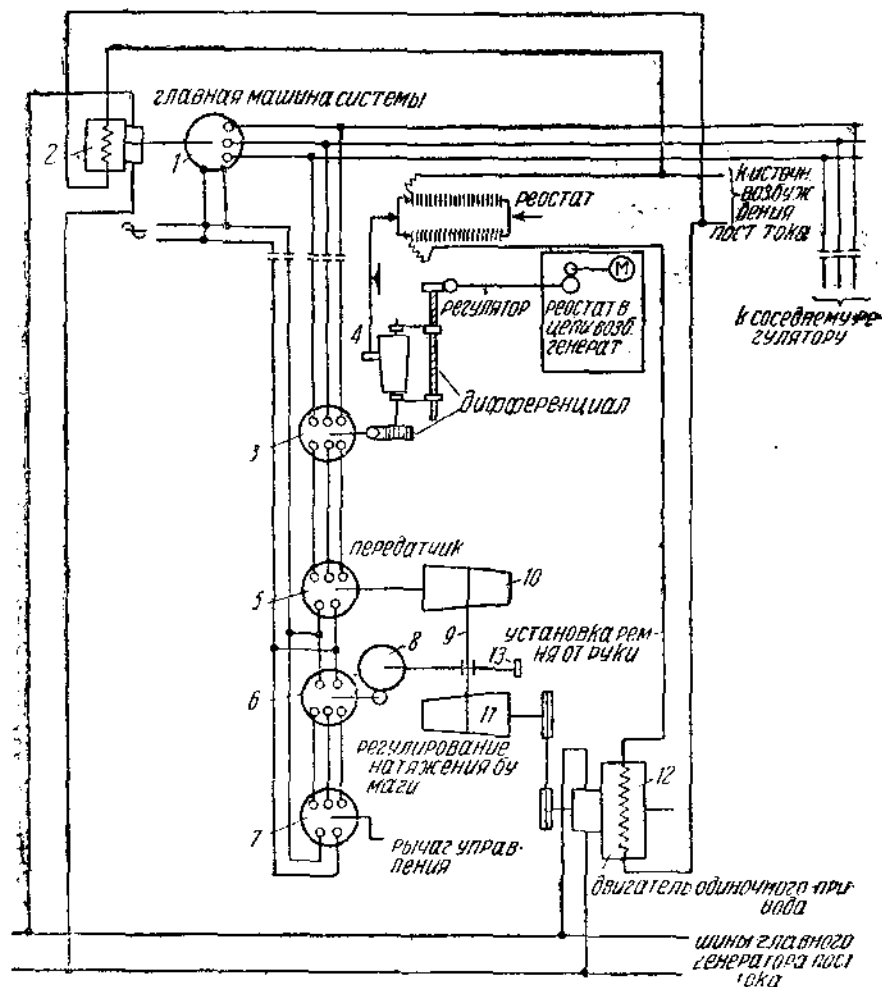


Рис. 216.

Изменение соотношения оборотов между двигателями 2 и 12 может осуществляться в целях регулирования натяжения бумаги (об этом см. § 151) путем перестановки ремня 9 непосредственно тягой 13 или же при помощи простой синхронной передачи 6, 7.

Быстрое распространение за последнее время указанной системы синхронной передачи на ряде бумажных фабрик в Америке свидетельствует о высоких технических показателях, которыми обладает эта система. К ее

выгодным сторонам относится также возможность вынесения почти всего регулирующего устройства за пределы машинного зала, что предохраняет всю аппаратуру от воздействия сырости. Предназначенные для установки в машинном зале машины синхронной передачи выполняются совершенно закрытыми и снабжаются шариковыми подшипниками. Таким образом они почти совершенно не поддаются влиянию сырости и требуют лишь регулярной смазки.

173. Сравнение трехфазной и однофазной систем синхронной связи. Применение в системе синхронной связи трехфазного или однофазного тока приводит к довольно различным характеристикам работы и наделает систему в обоих случаях только ей присущими особенностями. Так, при работе на трехфазном токе моменты приемника при вращении по полю и против поля получаются весьма различными, как различны и пределы скорости работы в обоих случаях. С этой точки зрения систему на трехфазном токе предпочтительнее применять там, где имеет место одно направление вращения. Иначе при работе по полю и против поля будут получаться различные углы θ , а следовательно и различная точность. Как показывают кривые рис. 185, при малых моментах углы θ при работе в обе стороны получаются примерно одинаковыми. Но при малых моментах выгоднее применить однофазную систему как более простую. G. Sartori¹ для сравнения моментов одинаковых по габаритам машин при трехфазной и однофазной первичной обмотке дает следующие выражения для приемника:

Трехфазная система:

$$M_3 = w \cdot \frac{\omega \cdot \Phi_m^2}{z_2} \left\{ (1 + \cos \theta) \cos (\theta + \varphi) + \sin \theta \sin (\theta + \varphi) \right\}. \quad (235)$$

Однофазная система (с неизменным воздушным зазором):

$$M_1 = w \cdot \frac{\omega \cdot \Phi_m^2}{2z_2} \cdot \sin \varphi \sin \theta, \quad (236)$$

где w — число витков фазы вторичной обмотки, z_2 — полное сопротивление вторичной цепи, а Φ_m — поток, сцепляющийся с одним витком. Синхронизирующий момент для обоих случаев имеет значение:

$$\frac{dM_3}{d\theta} = w \cdot \frac{\omega \cdot \Phi_m^2}{z_2} \cdot \sin (\theta + \varphi); \quad (237)$$

$$\frac{dM_1}{d\theta} = w \cdot \frac{\omega \cdot \Phi_m^2}{2z_2} \cdot \sin \varphi \cos \theta. \quad (238)$$

Наиболее существенным является синхронизирующий момент при $\theta \approx 0$. В этом случае выражения разнятся лишь на коэффициент $\frac{1}{2}$; это свидетельствует, что при трехфазном токе синхронизирующий момент получается примерно вдвое больше. Множитель $\sin \varphi$ неблагоприятнее сказывается на

¹ G. Sartori. Copiatori di movimenti a distanza (Teleindicatori). „L'Elettrotecnica“ от 5 мая 1931 г., № 13, стр. 306.

однофазной системе. Положим $\varphi = 40^\circ$ и $\theta = 30^\circ$. Тогда получим приближенно (не учитывая реакции вторичного тока)

$$M_3 = 1,11 \omega \cdot \frac{\omega \cdot \Phi_m^2}{z_2}$$

и

$$M_1 = 0,16 \omega \cdot \frac{\omega \cdot \Phi_m^2}{z_2},$$

т. е. в первом случае момент приближенно был бы в семь раз больше, чем во втором. Таким образом для передачи указаний и небольших моментов более подходит система на однофазном токе, так как в этом случае ее недостатки мало сказываются. Трехфазная система применяется преимущественно при больших моментах и работе в одну сторону (например в качестве электрического вала для синхронизирования между собой двигателей). Благодаря применению для управления на расстоянии обычно небольших мощностей, что обуславливает передачу с последующим усилением момента путем применения различного рода усилителей, вообще большее распространение получила однофазная система.

Следует отметить, что применяемые в настоящее время однофазные системы с явновыраженными полюсами дают синхронизирующий момент при $\oplus \approx \ominus$ примерно равный синхронизирующему моменту трехфазной системы.

СХЕМЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ СИНХРОННОГО ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ БЕЗ МЕХАНИЧЕСКОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ НИМИ

ГЛАВА XXVII.

СХЕМЫ СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ СИНХРОННОГО ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ.

174. Введение. Весьма близко по принципу действия к схемам синхронной связи индукционными машинами стоят различные схемы для поддержания строго синхронного вращения двигателей без механической связи между ними. В этом случае также применяется схема синхронной связи, которая только механически или одновременно и электрически соединена с приводными двигателями, синхронизм вращения между которыми поддерживается. Некоторые же схемы являются целиком подобными разобранным выше схемам синхронной связи или отличаются от них лишь небольшими видоизменениями.

Необходимость синхронного вращения двух двигателей (электрических или механических), механически между собой не связанных, встречается довольно часто в самых различных областях техники, именно там, где необходимо по конструктивным обстоятельствам вместо одного применить несколько приводных двигателей, работающих на одну общую нагрузку и расположенных на довольно значительном расстоянии друг от друга, которое мешает осуществлению механического сцепления их валов.

Например, подобная необходимость имеет место в больших подъемных кранах, корабельных доках, разводных мостах, при приводе орудийных башен и т. п.

Следует отметить, что синхронность вращения здесь понимается как строго одинаковое число оборотов всех двигателей, которое с нагрузкой может меняться одновременно у всех двигателей в одинаковой степени, причем указанный синхронизм между двигателями должен поддерживаться и при пуске и остановке их. В некоторых случаях синхронность вращения нужно понимать в более широком смысле, когда число оборотов двигателей должно быть не одинаковым, а составлять какое-либо определенное отношение. Если обозначить через $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ число оборотов отдельных двигателей, то должно быть соблюдено условие: $n_1 = k_1 n_2 = k_2 n_3$ и т. д.

При рассмотрении схем синхронной связи, осуществляемых при помощи индукционных машин, мы до известной степени коснулись и вопросов синхронного вращения, которое является по существу частным случаем применения схем синхронной связи. Так, на рис. 216 представлена схема для поддержания постоянства отношения числа оборотов между двигателями, причем в качестве регулирующего устройства служит дифференциальная система синхронной связи. Однако подобная схема регулирования не дает

строго синхронной связи между машинами, так как некоторое расхождение в оборотах, устраняемое затем регулировкой, неизбежно по самому принципу действия схемы регулирования.

Схема на рис. 179 может быть использована для синхронного вращения двух исполнительных механизмов, один из которых связан с валом приводного двигателя, а другой — с валом приемника. Очевидно, что тогда приводной двигатель должен быть рассчитан на сумму мощностей, потребных для привода обоих механизмов, причем мощность, необходимая для привода механизма, соединенного с приемником, должна все время передаваться по соединительной линии схемы. Более целесообразно при значительных мощностях привода применить для привода указанных механизмов отдельные двигатели, соединенные синхронной связью в виде двух индукционных машин, которая в этом случае должна будет передавать не полную энергию для привода одного из механизмов, а лишь половину разницы в нагрузках обоих механизмов, могущей обусловить при отсутствии синхронной связи разность в оборотах приводных двигателей.

175. Схема с синхронными машинами. Для поддержания синхронного вращения приводных двигателей *I* и *II* (рис. 217), которые могут

быть любого типа (электрические или механические), применены вспомогательные синхронные машины S_1 и S_2 , каждая из которых насажена на вал соответствующего приводного двигателя. Роторы этих машин возбуждаются постоянным током, а обмотки статоров включены навстречу друг другу, как у двух параллельно работающих синхронных машин.

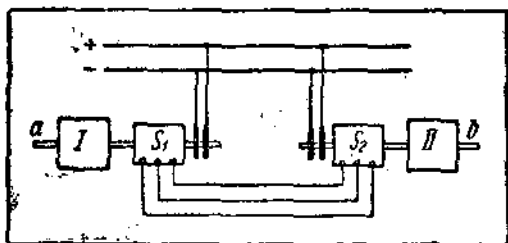


Рис. 217.

Допустим теперь, что двигатель *I* и *II* имеют совершенно одинаковые механические характеристики и одинаково нагружены. Тогда в статорах синхронных машин S_1 и S_2 индуцируются одинаковые по величине и фазе э. д. с., уравновешивающие друг друга (рис. 171), благодаря чему ток в цепи обмоток статоров равен нулю. Частота в указанной цепи определяется числом оборотов приводных двигателей и числом полюсов машин S_1 и S_2 . Если теперь нагрузка на один из двигателей, например на двигатель *I*, увеличилась, то ротор его в пространстве сдвигается на некоторый угол θ в сторону отставания относительно ротора двигателя *II*, благодаря чему на этот же угол сдвинется и ротор машины S_1 относительно ротора машины S_2 . Э. д. с. синхронных машин окажутся сдвинутыми по фазе на угол θ , что обусловит появление разности напряжений ΔE (рис. 173), которая создаст уравнительный ток I_2 , являющийся для машины S_1 током двигателя, а для машины S_2 — током генератора. Следовательно, машина S_1 на валу более нагруженной машины *I* будет работать двигателем, добавляя развиваемый ею момент к моменту, развиваемому двигателем *I*, и тем самым облегчая нагрузку последнего. Машина S_2 работает генератором, т. е. добавляет к меньшей нагрузке на валу двигателя *II* тормозной момент, благодаря чему обе машины *I* и *II* окажутся нагруженными одинаково. Для простоты предположим, что двигатель *II* идет вхолостую, а вал двигателя *I* нагружен некоторым тормозящим моментом $M_{тр}$ (предельный случай неравномер-

ности нагрузке), причем машины *I* и *II* одинаковы, равно как и машины S_1 и S_2 . Тогда благодаря схеме синхронной связи в виде машин S_1 и S_2 нагрузка на оба двигателя *I* и *II* распределится поровну, так как двигатель *II* будет работать на генератор S_2 , который посылает свою мощность двигателю S_1 , помогающему двигателю *I*. Таким образом последний развивает момент $M_T = 0,5 M_{тр}$ и машина S_1 также развивает момент $0,5 M_{тр}$ за счет мощности, получаемой от машины *II*. Очевидно, что при большей нагрузке на валу двигателя *II* роли машин S_1 и S_2 меняются: первая становится генератором, а вторая двигателем. Следует отметить, что так как каждый из двигателей получил благодаря действию машин S_1 и S_2 одинаковую нагрузку, то они уменьшат число оборотов в одинаковой мере, продолжая вращаться друг относительно друга синхронно. Цепь машин S_1 и S_2 можно рассматривать как механический вал, дающий жесткое соединение основных двигателей. Поэтому если механические характеристики или мощности двигателей *I* и *II* различны, то они будут нагружаться в таком отношении (в соответствии с характеристиками и мощностями), чтобы числа их оборотов снизились в равной мере. Наконец, если двигатели *I* и *II* построены на различное число оборотов (например 1500 и 750), то для их синхронизирования нужно применить синхронные машины S_1 и S_2 с соответственными числами полюсов, например 4 и 8.

Схема по рис. 217 обладает весьма существенным недостатком, заключающимся в том, что двигатели *I* и *II* не могут иметь надежной синхронной связи при малых оборотах и теряют ее вовсе в периоды пуска и остановки (с уменьшением числа оборотов уменьшается напряжение машин S_1 и S_2). Поэтому указанная схема может быть применена лишь при сравнительно малых пределах изменения оборотов машин *I* и *II* и при отсутствии необходимости в синхронной связи при пуске и остановке. Для включения на параллельное соединение машин S_1 и S_2 после разгона двигателей *I* и *II* необходимо применение синхронизирующих приспособлений, обычных для включения синхронных машин. Применяется подобная схема по причине отмеченного весьма существенного недостатка в основном для синхронизирования двигателей небольшой мощности (звуковое кино, телевидение и т. п.). В этом случае в качестве синхронизирующих машин применяются однофазные синхронные машины повышенной частоты, с неподвижной обмоткой возбуждения, например концентричной валу машины.

Для соединения синхронных машин может быть использован и способ беспроводной связи.

В этих схемах имеет место синхронное вращение осей с небольшим изменением скорости и не играет существенной роли отсутствие синхронизации при пуске и остановке осей.

Синхронное вращение основных двигателей по рис. 217 можно получить и при вращении их в разные стороны, для чего при соединении машин S_1 и S_2 нужно взять разный порядок следования фаз.

176. Схема с индукционными машинами. Схема с трехфазными индукционными машинами, служащими для тех же целей, что и синхронные машины в предыдущей схеме, получила довольно широкое распространение в установках средней и значительной мощности благодаря даваемой ею надежной синхронизации приводных двигателей как при вращении, так и в положении покоя, пуска и остановки. Принцип действия такой схемы (рис. 218) аналогичен принципу действия схемы синхронной передачи с трехфазными индукционными двигателями (рис. 179). На валах привод-

ных двигателей I и II сидят вспомогательные индукционные машины A_1 и A_2 , приключенные своими первичными обмотками к трехфазной сети, а вторичными соединенные между собой так, чтобы э. д. с. их были направлены навстречу друг другу. Векторные диаграммы этой схемы подобны диаграммам, представленным на рис. 171 и 173. Порядок следования фаз на первичных зажимах машин A_1 и A_2 может быть установлен таким, чтобы вращение их роторов от двигателей I и II производилось по полю или против поля. Допустим, что роторы вращаются по полю и вал двигателя I нагружен больше. Тогда ротор машины A_1 сдвинется по отношению к ротору машины A_2 на угол θ в сторону против вращения поля, благодаря чему первая машина окажется в режиме двигателя (момент направлен по полю) и будет помогать своему двигателю, а вторая машина в режиме генератора и будет нагружать его (момент направлен против поля и вращения двигателей). Следует отметить, что каждая из машин A_1 и A_2 может работать и как передатчик и как приемник, что зависит от того, какой из двигателей более нагружен. Передатчиком можно считать машину, сцепленную с менее нагруженным в данный момент двигателем. Кривые моментов в зависимости от угла θ и кривые максимальных моментов в зависимости от скорости вращения подобны представленным на рис. 176, 185, 187.

На рис. 219 представлен частный случай — схема для поддержания синхронного числа оборотов двух одинаковых асинхронных двигателей I и II при вращении роторов вспомогательных машин A_1 и A_2 против поля (на схеме R — общий пусковой реостат). Возьмем предельный случай неравенства нагрузок, когда на валу двигателя I имеет место нагрузка, соответствующая двойной номинальной мощности двигателя I ($2P_1$), а двигатель II идет вхолостую. Роторы машины A_1 и A_2 сдвинуты друг относительно друга на угол θ , причем ротор первой машины сдвинут по полю, благодаря чему упреждающим по отношению к последнему является ротор второй машины. Поэтому энергия P_2 поступает в статор машины A_2 и создает тормозящий момент для двигателя II , который нагружается на мощность P_1 , поглощая ее из сети (потери во всех машинах для простоты пренебрегаем). Таким образом от ротора машины A_2 к ротору машины A_1 поступает мощность $P_1 + P_2$. Режим работы машины A_2 можно уподобить генераторному режиму работы машины двойного питания от различных сетей с разными частотами и вращением полей в одну сторону, причем на роторе частота больше, чем на статоре, благодаря чему машины вращаются в сторону, противоположную вращению поля статора, и суммарная мощность $P_1 + P_2$ передается в сеть с большей частотой (см. § 139). Поступившая в машину A_1 мощность $P_1 + P_2$ делится на две части: часть P_1 преобразуется в механическую и расходуется на нагрузку вместе с мощностью P_1 , сообщаемой валу двигателем I , вторая же часть — P_2 — отдается сети. (Машина A_1 находится в режиме двигателя двойного питания с вращением полей в одну сторону и частотой на роторе, большей частоты статора). Таким образом оба двигателя I и II оказываются нагру-

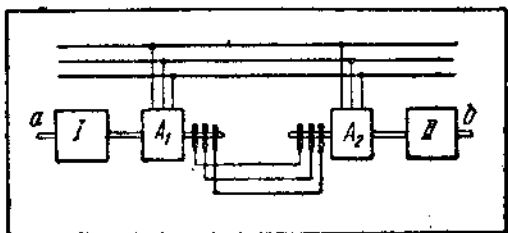


Рис. 218.

женными одинаково. В указанных условиях вспомогательные машины передают мощность

$$\frac{2P_1 - 0}{2} = P_1$$

или половину разницы в нагрузке обоих двигателей. Если бы вал двигателя *I* был нагружен на $1,5 P_1$, а вал машины *II* на $0,5 P_1$, то машины *A*₁ и *A*₂ передавали бы мощность

$$\frac{(1,5 - 0,5) P_1}{2} = 0,5 P_1.$$

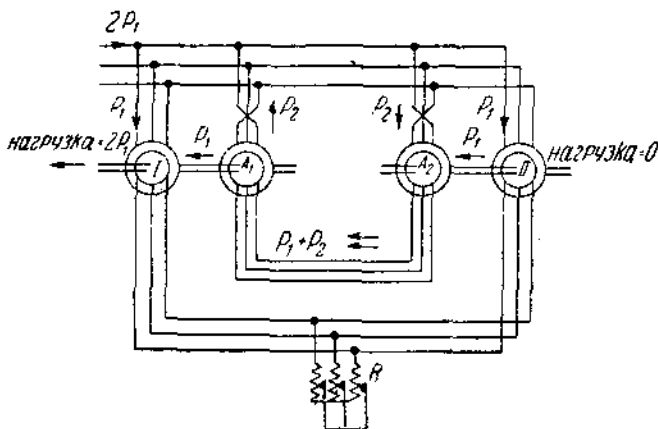


Рис. 219.

Поэтому мощность вспомогательных машин надо рассчитывать на половину ожидаемой разности нагрузок на синхронно вращающиеся валы. Чаще применяют схему с вращением роторов против поля благодаря тому, что предел изменения оборотов менее ограничен, как указывалось ранее, а затем и вращающие моменты получаются больше (см. рис. 187).

Пусть на схеме по рис. 219 все четыре машины одинаковы, причем максимальный момент при работе их нормальными асинхронными двигателями в 2,5 раза больше номинального момента. В этом случае можно было бы на валу одного из двигателей получить, если второй двигатель не нагружен, максимальный момент, равный примерно пятикратному номинальному моменту. На рис. 220 представлены кривые моментов для этого случая в функции угла θ . Если потерями в машинах *A*₁ и *A*₂ пренебречь, то, как это следует из рис. 189, максимальный момент передачи может быть несколько больше (примерно на 20%) максимального момента отдельного двигателя. На рис. 220 *M*₁ — кривая моментов двигателей *I* и *II*; *M*_х — максимальный их момент; *M*_н — номинальный момент двигателей *I* и *II*; *M*_{А1} — кривая моментов машины *A*₁; *M* — суммарный момент на валу двигателя *I* ($M = M_1 + M_{A1}$).

Как правило, вспомогательные машины *A*₁ и *A*₂ достаточно брать на половину мощность приводных двигателей, что обеспечивает синхронность вращения при всех режимах (пуск, остановка, перегрузка). Если имеется целый ряд связанных вспомогательными машинами приводных двигателей одинаковой мощности, то, исходя из соотношений для мощностей статора

и ротора машины двойного питания, установленных в § 139 для случая работы машины от сетей с разными частотами при вращении полей в одну сторону, можем написать следующие выражения, учитывающие распределение мощностей на отдельные машины:

Пусть $P_{n1}, P_{n2}, P_{n3} \dots$ — мощности нагрузки на каждом из валов n приводных двигателей; $P_{A1}, P_{A2}, P_{A3} \dots$ — мощности, передаваемые на вал или получаемые от вала приводного двигателя вспомогательными машинами; $P_{S1}, P_{S2} \dots$ и $P_{R1}, P_{R2} \dots$ — соответственно электромагнитные мощности в статорах и роторах вспомогательных машин. Если приводные двигатели одинаковы, то в результате действия вспомогательных машин каждый из приводных двигателей будет сообщать своему валу одну и ту же мощность вне зависимости от распределения нагрузок на отдельные валы. Следовательно, можем написать: мощность, развиваемая каждым приводным двигателем

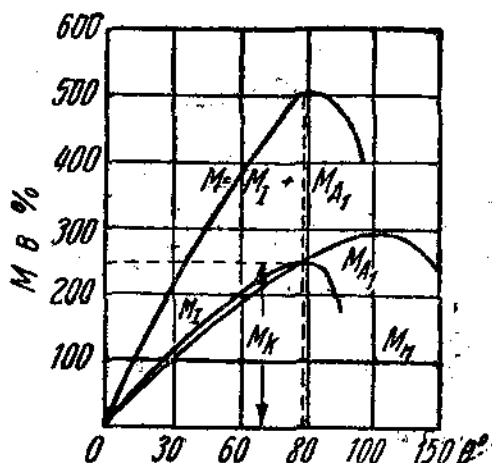


Рис. 220.

$$P_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ni}. \quad (239)$$

Разницу между мощностью P_d и действительной нагрузкой на данный вал должна покрывать вспомогательная машина:

$$\left. \begin{aligned} P_{A1} &= P_{n1} - P_d \\ P_{A2} &= P_{n2} - P_d \end{aligned} \right\} \quad (240)$$

и т. д.

В § 139 было установлено, что механическая мощность двигателя двойного питания при вращении полей в одну сторону равна разности электромагнитных мощностей статора и ротора, т. е. пропорциональна разности частот на статоре и роторе.

Поэтому можно написать:

$$\begin{aligned} P_S &= \frac{n_S}{\pm n} \cdot P_A; \\ P_R &= \frac{n_S - (\pm n)}{\pm n} \cdot P_A; \end{aligned} \quad (241)$$

$$\frac{P_R}{P_S} = \frac{n_S - (\pm n)}{n_S}. \quad (242)$$

Здесь P_A — механическая мощность двигателя двойного питания. Следует отметить, что приведенные соотношения справедливы и для обычных синхронных и асинхронных машин.

Знак минус перед величиной n означает вращение против направления вращения поля. Знак минус перед величиной мощности P_S свидетельствует о том, что данная обмотка отдает мощность (генераторный режим).

Пусть, например, имеют место три приводных двигателя 1, 2, 3 (рис. 221) постоянного тока, связанных вспомогательными асинхронными машинами I, II, III. Вращение производится по полю $\frac{n}{n_S} = \frac{2}{3}$, причем вал двига-

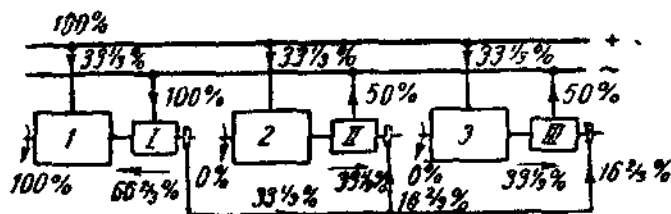


Рис. 221.

теля 1 нагружен на 100%, а валы остальных машин не несут нагрузки. Распределение мощностей на вспомогательные машины получится следующее (потери пренебрегаются) при отношении $\frac{n}{n_S} = \frac{2}{3}$:

$$P_d = \frac{1}{3} \cdot 100 = 33 \frac{1}{3} \%;$$

$$P_{A1} = P_{\kappa_1} - P_d = 100 - 33 \frac{1}{3} = 66 \frac{2}{3} \%;$$

$$P_{S1} = \frac{n_S}{n} \cdot P_{A1} = \frac{3}{2} \cdot 66 \frac{2}{3} = 100\%;$$

$$P_{R1} = -33 \frac{1}{3} \%;$$

$$P_{A3} = P_{A2} = P_{\kappa_2} - P_d = -33 \frac{1}{3} \%/;$$

$$P_{S2} = P_{S3} = \frac{n_S}{n} \cdot P_{A3} = -50\%;$$

и т. д.

Распределение нагрузок получится такое, как изображено на рис. 221. При вращении системы против поля с той же скоростью $\frac{n}{n_S} = \frac{2}{3}$ распределение механических мощностей остается тем же:

$$P_d = 33 \frac{1}{3} \%; P_{A1} = 66 \frac{2}{3} \%;$$

$$P_{A2} = P_{A3} = -33 \frac{1}{3} \%.$$

Электромагнитные мощности во вспомогательных машинах распределяются иначе:

$$P_{S1} = -\frac{3}{2} 66 \frac{2}{3} = -100\%;$$

$$P_{R1} = 166 \cdot \frac{2}{3} \%;$$

$$P_{S2} = P_{S3} = 50\%;$$

$$P_{R2} = P_{R3} = -83 \frac{1}{3} \%.$$

Из рассмотренного следует, что сеть, питающая машины I, II, III, будет лишь покрывать потери в указанных машинах и доставлять намагничивающий ток. Подобным же образом может быть получено распределение мощностей на вспомогательные машины для любого количества приводных двигателей с любым распределением нагрузок на их валах.

Следует отметить, что соединение при помощи вспомогательных машин может быть осуществлено и для приводных двигателей на различные числа оборотов, находящиеся в соотношении, соответствующем отношению чисел полюсов машин переменного тока (2, 3, 4 и т. д.). В таком случае вспомогательные машины должны быть взяты с различным числом полюсов, отвечающим числам оборотов отдельных приводных двигателей.

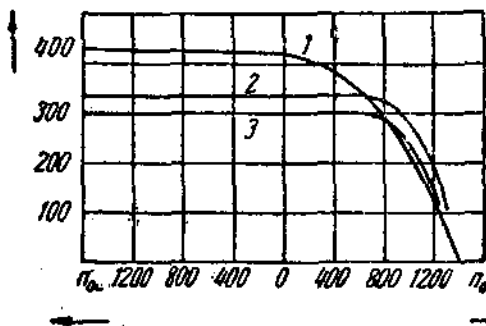


Рис. 222.

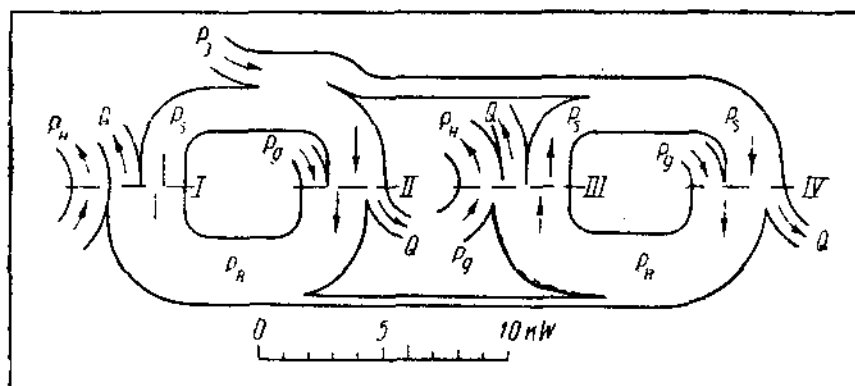


Рис. 223.

На рис. 222 показаны опытные кривые допустимой разницы нагрузок ($M_{\max}$ в процентах от нормального момента) для вспомогательных асинхронных машин в 6,5 kW мощности и с синхронным числом оборотов равным 1500. Величина допустимой разницы нагрузок приведена в зависи-

мости от числа оборотов по полю и против поля. Кривая 1 дает эту зависимость при применении двух вспомогательных машин (подобно рис. 218), а кривые 2 и 3—для трех машин (подобно рис. 221).

Если из трех агрегатов один нагружен сильнее, чем два остальных, нагруженных одинаково, то предельный момент машин выше (кривая 2), чем в обратном случае, когда два агрегата нагружены одинаково и больше, чем третий. Соответственно получают для 4 или n агрегатов верхнюю кривую при 3 или $(n - 1)$ менее нагруженных и одной сильнее нагруженной машины, а нижнюю кривую при 3 или $(n - 1)$ сильнее и одной слабее нагруженных машинах.

Из кривых рис. 222 видно, что более надежной является работа против поля, дающая при любой скорости постоянные допустимые моменты перегрузки. Величина последних зависит, как и при обычной работе двигателя, от квадрата приложенного напряжения, которое поэтому не должно снижаться.

На рис. 223 и 224 дана энергетическая диаграмма мощностей и потерь для четырех агрегатов при вращении вспомогательных машин против поля.

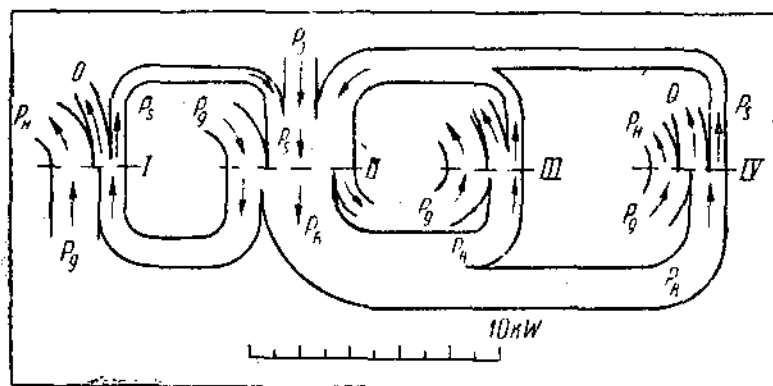


Рис. 224.

Указанные картины получены на основании испытания агрегатов из приводного двигателя постоянного тока мощностью в 3,3 kW при 950 об/мин. и вспомогательной асинхронной машины в 5,5 kW при 1500 синхр. об/мин.

Здесь P_H — механическая нагрузка вала агрегата; P_3 — мощность, подведенная из трехфазной сети; P_g — мощность, поступающая из сети постоянного тока; P_R — мощность в цепи ротора; P_S — мощность в цепи статора; Q — суммарные потери агрегата.

На рис. 223 имеет место одинаковая нагрузка на валы агрегатов I и III и вращение вспомогательных машин против поля со скоростью $n = 560$ об/мин. В результате все четыре приводных двигателя оказываются нагруженными одинаково и потребляют из сети постоянного тока мощность P_g . Можно сказать, что агрегат II берет половину нагрузки агрегата I, а агрегат IV — половину нагрузки агрегата III. Распределение мощностей (без учета потерь) получается согласно приведенным выше соотношениям (239—242). Асинхронные машины ненагруженных агрегатов II и IV работают в режиме тормоза (мощность поступает из трехфазной сети). Благодаря мощности P_g , добавляемой приводными двигателями, мощность на

роторе указанных машин составляет $P_R = P_s + P_g - Q$. Добавленная мощность P_g в агрегатах II и IV передается валам агрегатов I и III.

В случае нагрузки валов трех агрегатов I, III и IV на равные мощности (рис. 224) одна асинхронная машина ненагруженного агрегата II должна покрывать потери во всех асинхронных машинах. Поэтому максимальная разность моментов при $(n-1)$ нагруженных агрегатов и одним ненагруженным, как это следует из кривых рис. 222, будет ниже, чем при одном нагруженном агрегате. В последнем случае имеет место работа одного приемника от нескольких параллельно включенных передатчиков или, что то же, как бы от одного мощного передатчика, большего чем приемник. (Соотношения по рис. 222 подтверждаются выводами § 162.)

Трехфазная вспомогательная сеть, кроме покрытия потерь, доставляет намагничивающий ток для всех индукционных вспомогательных машин.

Картина распределения доставляемой указанной сетью реактивной мощности B_f для случая по рис. 224 изображена на рис. 225, из которой следует, что при вращении против поля асинхронная машина агрегата II,

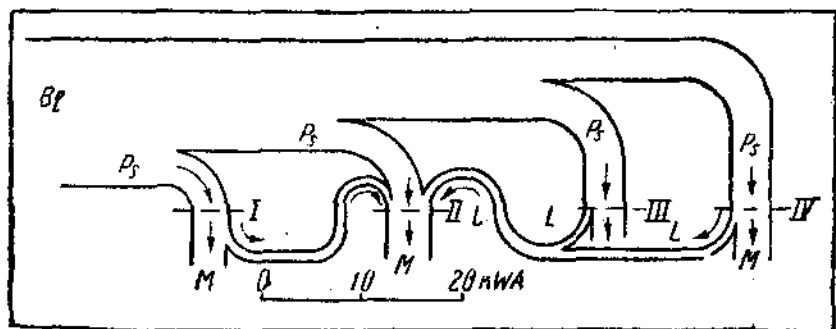


Рис. 225.

работающая в качестве передатчика, частично получает намагничивающий ток с ротора от остальных машин, работающих в режиме приемника, причем в цепи ротора поток реактивной энергии противоположен по направлению потоку активной энергии. Из сопоставления рис. 224 и 225 (масштабы различны) видно, что коэффициент мощности в цепи роторов высок (около 0,9), в цепи же статоров значительно ниже, причем он для машины ненагруженного агрегата лучше, чем для остальных машин (на рис. 225 M — реактивная мощность, необходимая для намагничивания машины, а L — реактивная мощность, передаваемая через ротор).

Очевидно, что для нормальной работы вспомогательных асинхронных машин, связывающих несколько приводных двигателей, необходимо, чтобы последние имели одинаковые характеристики, а в случае двигателей постоянного тока нужно также наличие одинаковой регулировки их скорости (связывание регуляторов тока в цепи возбуждения в одну систему, последовательное соединение якорей машин и т. д.).

Если нагрузка на предназначенные вращаться синхронно валы предполагается различной постоянно, то мощности приводных двигателей выбираются различными, причем мощность вспомогательных машин определяется мощностью меньшего из приводных двигателей. Поэтому последний будет находиться под влиянием режима работы более мощного двигателя.

Если постоянная разница в нагрузках весьма велика, оказывается возможным совершенно отказаться от малого приводного двигателя и передавать всю мощность, требующуюся для валов с меньшей нагрузкой, через индукционные машины (нормальная синхронная передача—рис. 179). Если для привода с постоянно неравными нагрузками вращающихся валов применяются последовательно соединенные между собой шунтовые двигатели постоянного тока, их следует рассчитать для напряжений, соответствующих мощностям.

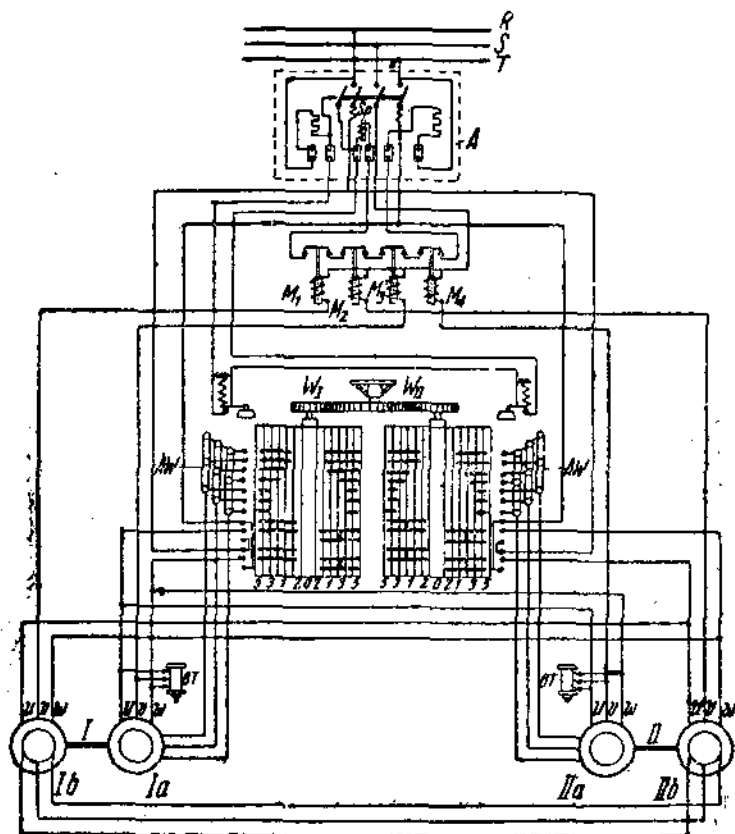


Рис. 226.

177. Практическая схема со вспомогательными индукционными машинами. Приведенная выше принципиальная схема синхронного вращения двигателей с индукционными вспомогательными машинами должна быть несколько усложнена применением устройств, обеспечивающих неизменное положение валов агрегатов при различных отклонениях от нормального состояния сети или режима работы самих агрегатов.

Так, при повышении нагрузочного момента свыше установленного значения вся система должна останавливаться, равно как и при значительном снижении напряжения в сети, питающей вспомогательные машины. На рис. 226 изображена практическая схема с индукционными приводными и вспомогательными машинами.

Отключение всей системы при понижении напряжения происходит при помощи находящейся в распределительном ящике A и питаемой от напряжения сети включающей катушки S_p . Выключатели максимального тока M_1 и M_2 включены в цепь статора вспомогательных машин Ib и IIb . Контакты указанных выключателей, через которые замыкается цепь тока включающей катушки, соединены последовательно с контактами выключателей максимального тока M_3 и M_4 для приводных двигателей Ia и IIa и контактами выключателей нулевого тока контроллеров W_I и W_{II} .

Приводимые вместе контроллеры имеют промежуточное положение z , при котором посредством контроллера W_{II} под напряжение подводятся только статоры вспомогательных машин с требуемым направлением вращающегося поля. При выключении системы указанное промежуточное положение может быть оставлено не ранее, чем приводные двигатели будут под действием тормозов приведены в состояние покоя.

178. Пример применения схемы со вспомогательными индукционными машинами. В качестве одного из примеров применения схемы со вспомогательными индукционными машинами может быть приведена уста-

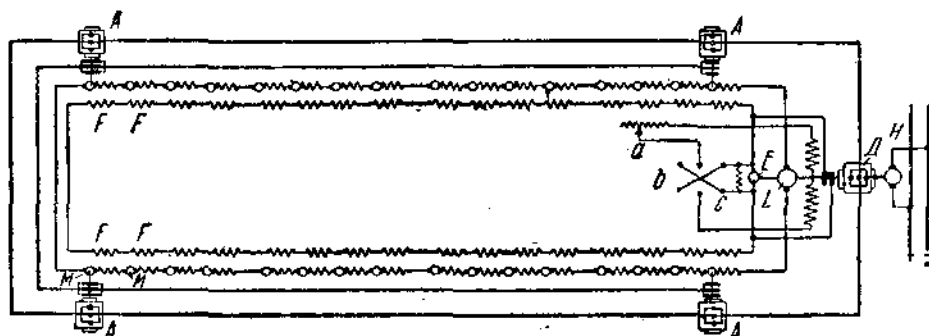


Рис. 227.

новка для привода канатного подъемника для дока¹ (рис. 227). Судовместилище дока, имеющее в длину 85 м и ширину 12 м, поднимается посредством 32 лебедок, приводимых от отдельных двигателей M постоянного тока. Применение соединительных валов для всей системы двигателей, с целью равномерного подъема вместилища, привело бы к чрезвычайно сложной конструкции. Вопрос разрешается установкой по углам системы на валах четырех приводных двигателей вспомогательных индукционных машин A , роторы которых электрически связаны между собой. Последовательное включение якорей приводных двигателей преследует цель получения при одинаковом их возбуждении равных моментов. На рис. 227 L — генератор с регулируемым в широких пределах напряжением; D — генератор трехфазного переменного тока для питания вспомогательных машин A ; H — двигатель для привода обоих генераторов; E — возбуждатель; F — обмотки возбуждения двигателей M (c — положение выключателя при опускании; b — положение при подъеме). Отсутствие жестких связей между двигателями M (кроме угловых четырех) позволяет в случае удлинения приводных канатов у какого-либо из двигателей, за счет временного увеличения числа оборотов последним, обеспечить равномерное натяжение всех канатов.

¹ O. Krell, Seilaufzug für ein Schiffshebewerk, „Die Bautechnik“, 1925, Heft 37; 1926, Heft 7.

СХЕМЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ СИНХРОННОГО ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМИ ОБМОТКАМИ.

179. Введение. Схемы со вспомогательными машинами позволяют получать синхронное вращение как электрических, так и механических двигателей. Кроме того, специально для электрических двигателей могут быть применены схемы без вспомогательных синхронных или индукционных машин. Указанные схемы основаны на применении или вспомогательных обмоток в двигателях или на электрическом соединении рабочих обмоток последних. Таким образом, подобные схемы позволяют освободиться от вспомогательных машин, удешевив тем самым всю установку. Однако, технические показатели этих схем оказываются ниже, чем схемы с индукционными вспомогательными машинами (§ 175), и, примерно, подобны показателям схем с синхронными машинами, что ограничивает область их применения.

Электрическое соединение обмоток для синхронизирования двух или нескольких двигателей возможно как для асинхронных двигателей, так и для двигателей постоянного тока.

180. Схема для синхронного вращения асинхронных двигателей со вспомогательными обмотками. Эта схема, предложенная проф. В. С. Кулебакиным и А. И. Ларионовым, является как бы совмещением приводных асинхронных двигателей со вспомогательными, благодаря чему во вторичной системе имеются две обмотки (приводного двигателя и вспомогательной машины), а в первичной — одна общая для двух совмещенных машин обмотка. Схема представлена на рис. 228. Каждая фаза ротора обеих машин состоит из двух частей — рабочей V_1 (или V_2) и вспомогательной — W_1 (или W_2). Вспомогательная обмотка может быть электрически соединена с рабочей обмоткой, т. е. представлять как бы ее продолжение (этот случай и изображен на рис. 228), или же быть выполненной как совершенно самостоятельная обмотка. Концы фаз рабочих обмоток обоих двигателей присоединены к общему пусковому реостату r_n . Концы же фаз вспомогательных обмоток через добавочные кольца, линию l_1 и выключатель включены навстречу друг другу так же, как это имело место и в схеме со вспомогательными индукционными машинами. (В данном случае однако каждая из фаз вспомогательной обмотки имеет выведенными оба конца, приключенные через провода l_1 и l_2 к соответствующей фазе другого двигателя.) После пуска реостат замыкается накоротко, т. е. замыкаются коротко соединительные проводники l_2 , представляющие теперь как бы нулевой соединительный провод между соединенными на звезду вспомогательными обмотками W_1 и W_2 . Так как двигатели вращаются с некоторым скольжением, то в обмотках W_1 и W_2 индуктируются некоторые э. д. с. E_2' и E_2'' , причем в случае одинаковых тормозящих моментов на валу двигателей и идентичности характеристик последних обмотки роторов занимают в пространстве в каждый данный момент одинаковое положение и поэтому э. д. с. E_2' и E_2'' уравнивают друг друга, обуславливая отсутствие тока во вспомогательной цепи. При разных моментах ротор более нагруженного двигателя сдвинется на некоторый угол θ против направления вращения, что вызовет сдвиг по фазе э. д. с. E_2' и E_2'' и уравнивающий ток. Режим работы вспомогательных обмоток на роторах двигателей подо-

бен работе отдельных вспомогательных индукционных машин при вращении их по полю со скоростью, близкой к синхронной скорости (скольжение двигателей невелико). Следовательно и характеристики указанных обмоток будут соответствовать характеристикам для этого случая (рис. 172 и 222). Из кривых последних рисунков видно, что максимальный момент для вспомогательных обмоток будет весьма мал, и поэтому разница в нагрузках на валах двигателей может быть допущена лишь незначительная.

Для уменьшения числа контактных колец можно питать двигатели с ротора, а вспомогательную обмотку вместе со вторичной рабочей расположить на статоре.

На рис. 229, а и б представлены векторные диаграммы двигателей, включенных по схеме рис. 228, причем диаграмма по рис. 229, а принадлежит двигателю более нагруженному, а диаграмма по рис. 229, б, — менее нагруженному. Здесь э. д. с. E_2 является э. д. с., индуцируемой в рабочих обмотках роторов двигателей, а э. д. с. E'_{2b} и E''_{2b} — во вспомогательных обмотках. При сдвиге роторов на угол θ возникает разность напряжений ΔE , которая создает уравнивающий ток I_{2b} , являющийся генераторным током для вторичной обмотки более нагруженного двигателя, так как э. д. с. ее, благодаря сдвигу вторичной обмотки против вращения поля, опережает э. д. с. вторичной обмотки менее нагруженного

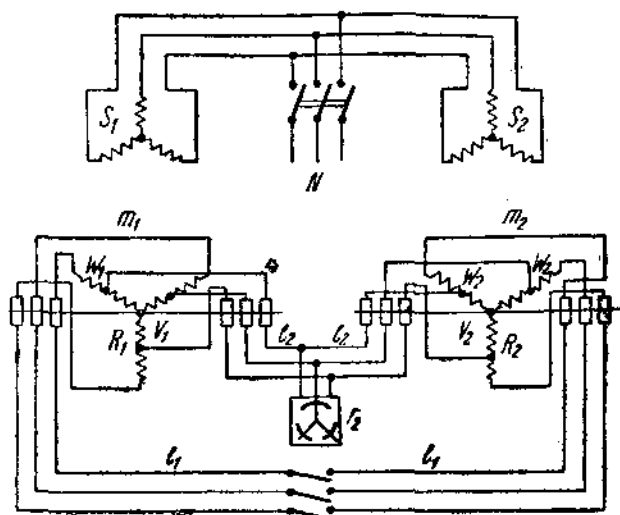


Рис. 228.

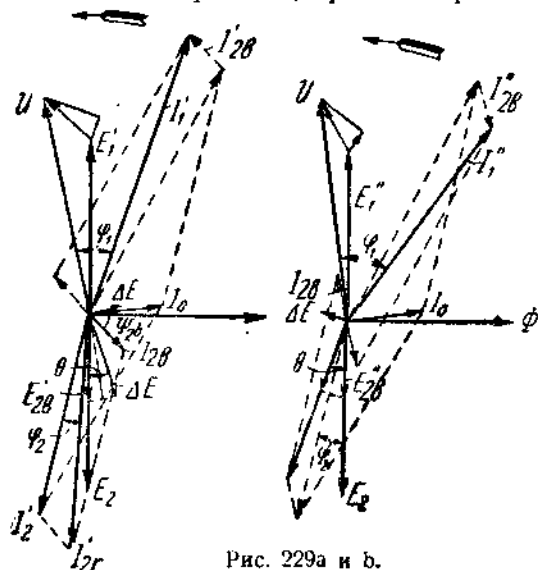


Рис. 229а и б.

двигателя (вторичные э. д. с. вспомогательных обмоток на векторной диаграмме двигателя образуют потенциальную диаграмму, сдвинутую против обычного ее положения на 180°).

Для первичной обмотки в более нагруженной машине ток I_{2b} является током двигателя, а в менее нагруженной машине он, ослабляя вращающий момент, является током генератора (см. рис. 173). В результате обе машины в равной мере несколько уменьшают число оборотов, увеличивая свое скольжение для того, чтобы покрыть одинаковое увеличение момента, равное при одинаковых двигателях половине разности тормозящих моментов на валах двигателей. Величина тока I_{2b} равна (рис. 229):

$$I_{2b} = \frac{2E_2 b \sin \frac{\theta}{2}}{z_{2b}} = \frac{E_{2b} \sin \frac{\theta}{2}}{z_{2b}}, \quad (243)$$

где z_{2b} — полное сопротивление фазы вспомогательной обмотки.

В более нагруженном двигателе ток I_{2b} создает дополнительный момент, равный (рис. 219,а):

$$\Delta M_1 = c \Phi' I_{2b} \sin \left(\psi_{2b} - \frac{\theta}{2} \right). \quad (244)$$

В менее нагруженном двигателе (работает как передатчик в схеме синхронной связи, образованной вспомогательными обмотками) этот же ток создает тормозящий момент (рис. 229б)

$$\Delta M_2 = c \Phi'' I_{2b} \sin \left(\psi_{2b} + \frac{\theta}{2} \right). \quad (245)$$

Таким образом, разность вращающих моментов, обусловленная нагрузками на их валах, может быть выражена (при $\Phi' = \Phi'' = \Phi$):

$$\begin{aligned} M_1 - M_2 &= \Delta M_1 + \Delta M_2 = c \Phi I_{2b} \left[\sin \left(\frac{\theta}{2} - \psi_{2b} \right) + \sin \left(\frac{\theta}{2} + \psi_{2b} \right) \right] = \\ &= c \Phi I_{2b} 2 \cos \frac{\theta}{2} \sin \psi_{2b}. \end{aligned}$$

Так как

$$\sin \psi_{2b} = \frac{x_{2b}}{z_{2b}}$$

и

$$I_{2b} = \frac{E_{2b}}{z_{2b}} \sin \frac{\theta}{2},$$

то можем написать

$$\begin{aligned} M_1 - M_2 &= 2 c \Phi E_{2bs} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cdot \frac{x_{2bs}}{z_{2bs}^2} = \\ &= c \Phi E_{2bs} \sin \theta \left(\frac{x_{2bs}}{z_{2bs}^2} \right). \end{aligned} \quad (246)$$

(Здесь E_{2bs} , x_{2bs} , z_{2bs} — значение э.д.с. E_{2b} и параметров ротора при скольжении s .)

Таким образом выражение для $M_1 - M_2$ при скольжении s приобретает значение:

$$M_1 - M_2 = c \Phi E_{2b} \cdot \frac{s^2 x_{2b}}{z_{2b}^2} \sin \theta. \quad (247)$$

Отношение этой разности моментов к моменту, создаваемому токами рабочих обмоток ротора, имеет вид:

$$m = \frac{M_1 - M_2}{M_1} = \frac{c_2' E_{2b} s^2 x_{2b} z_2^2}{c_2 E_2 z_{2b} s x_2} \sin \theta = \frac{w_2^2}{v_2^2} \cdot \frac{s \cdot x_{2b}}{z_{2b}^2} \cdot \frac{z_2^2}{x_2} \cdot \sin \theta. \quad (248)$$

Здесь

$$c_2 = c v_2; \quad c_2' = c w_2,$$

где w_2 и v_2 — соответственно числа витков в фазе вспомогательной и рабочей вторичных обмоток на роторе.

Из полученной формулы видно, что отношение допустимой разности моментов к моменту, развиваемому рабочей обмоткой, пропорционально квадрату числа витков вспомогательной обмотки, скольжению и индуктивному сопротивлению.

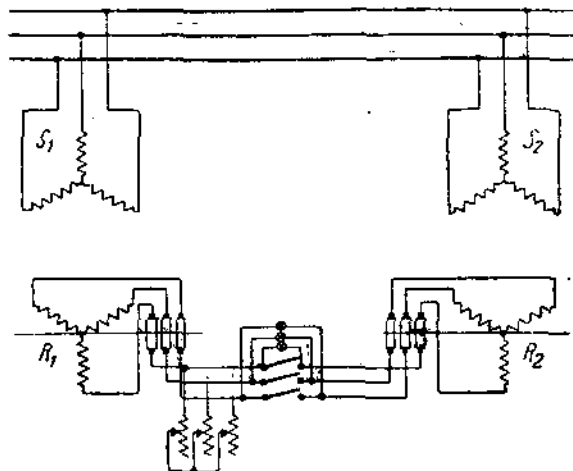


Рис. 230.

Основным организеским недостатком такого рода системы является то, что размещение вспомогательной обмотки на роторе приводного двигателя обуславливает работу указанной обмотки при малом скольжении, т. е., как

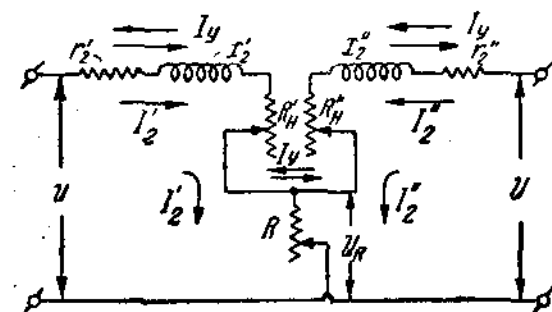


Рис. 231.

видно из рис. 187 и 222, при малом синхронизирующем моменте (следовательно обмотка дает малый эффект и слабо используется).

181. Схемы для синхронного вращения асинхронных двигателей с реостатом в цепи роторов. Дальнейшим шагом от предыдущей схемы является предложение использовать рабочую обмотку ротора одновременно и как вспомо-

гательную для синхронизирования двух или нескольких двигателей. Подобная схема представлена на рис. 230, из которого видно, что двигатели, соединенные по схеме синхронного поворота (э. д. с. роторов включены навстречу), кроме того включены на общий реостат, который в этом случае служит не только для пуска, но остается частично введенным и при работе системы.

Таким образом, если после пуска двигателей при помощи общего реостата (он должен быть рассчитан на сумму мощностей двигателей) его не вывести до конца, то на зажимах реостата будет иметь место некоторое

напряжение (равное падению напряжения в реостате), которое и обусловит синхронную связь между роторами двигателей при увеличенном скольжении.

На рис. 231 изображена схема, эквивалентная схеме двух роторов асинхронных двигателей, соединенных по схеме рис. 230.

На зажимах реостата имеет место напряжение, равное $U_R = (I_2' + I_2'')R$; при одинаковых нагрузках двигателей можно написать $U_R = 2I_2 R$ (R — сопротивление невыведенной части реостата). Сопротивления R_N' и R_N'' являются, как обычно, сопротивлениями, потери в которых равны механической мощности, развиваемой двигателем на валу. Общее активное сопротивление в эквивалентной схеме роторов должно, как известно, быть равно

$$\frac{r_2' + 2R}{s} \text{ и } \frac{r_2'' + 2R}{s}$$

или, вычитая из этих выражений соответственно $(r_2' + 2R)$ и $(r_2'' + 2R)$, получим:

$$R_N' = \frac{(r_2' + 2R)(1-s)}{s}$$

и

$$R_N'' = \frac{(r_2'' + 2R)(1-s)}{s};$$

при равных нагрузках

$$R_N = \frac{(r_2 + 2R)(1-s)}{s}. \quad (249)$$

Если положить, что $s = 0,5$, то $R_N = r_2 + 2R$. Таким образом, примерно половина мощности, передаваемой со статора на ротор, тратится в реостате, что делает такую схему довольно неэкономичной. При $s = 0,5$ э. д. с. E_{2s} равна половине э. д. с. E_2 при покое ротора и следовательно

$$U_R = 0,5 E_2 - I_2 z_2.$$

Если пренебречь величиной z_2 , то $U_R = E_{2s}$. При разных нагрузках на валах двигателей роторы их разойдутся на угол θ , на который по фазе сдвинутся и э. д. с. E_{2s}' и E_{2s}'' . Это обусловит уравнивающий ток I_y , который в более нагруженном двигателе будет геометрически складываться с током I_2 , увеличив тем самым момент двигателя, а в менее нагруженном — вычитаться из тока I_2 , уменьшая тем самым вращающий момент и заставляя этот двигатель в равной мере с более нагруженным двигателем увеличивать скольжение. Ток I_y замыкается, как указано на рис. 231, в цепи обмоток роторов, не заходя в реостат R .

Явления в этой системе по существу подобны явлениям, имеющим место в цепи параллельно работающих синхронных генераторов при перераспределении их нагрузки.¹

Величина тока I_y обуславливается э. д. с. ΔE , E_{2s} и сопротивлениями вторичной цепи (см. например рис. 173).

¹ Интересно отметить, что, примерно, подобная схема с асинхронными двигателями применяется в качестве модели сети переменного тока с синхронными генераторами при рассмотрении вопросов параллельной работы их. См. Лебедев и Жданов, Устойчивость параллельной работы электрических систем, 1933 г., стр. 102—103.

При разомкнутом реостате мы имеем схему синхронного поворота (рис. 170), причем синхронизирующий момент ($s=1$) является при данном угле θ наибольшим. Вместе с тем момент, развиваемый машинами как приводными двигателями, равен нулю.

При конечном сопротивлении реостата имеет место как бы совмещение двух схем: схемы приводных двигателей с короткозамкнутым ротором и схемы синхронного поворота при вращении системы по полю со скоростью, обусловленной сопротивлением реостата R .

Вместо последнего может быть применена вспомогательная коллекторная машина подобно тому, как это имеет место в схеме каскада асинхронного двигателя с коллекторной машиной при регулировании скорости (коллекторная машина по существу в этом случае является „экономическим“ реостатом).

При замкнутом коротко реостате двигатели работают независимо друг от друга, как обычные короткозамкнутые двигатели. Таким образом, при уменьшении сопротивления реостата в системе постепенно уменьшаются свойства схемы синхронного поворота и приобретаются все большие и большие качества нормального асинхронного двигателя. Работа системы в отношении синхронной связи подобна работе схемы синхронного поворота при вращении по полю с некоторой скоростью, меньшей синхронной скорости (рис. 187).

Как показывают исследования, для получения на зажимах реостата напряжения, обеспечивающего синхронизирующий момент при разнице в нагрузке от 10 до 15%, необходимо наличие скольжения в 20 ÷ 25%, что сказывается довольно значительно на к. п. д. установки или требует наличия коллекторной машины. Если предполагается большая неравномерность нагрузок, то более удачным разрешением вопроса может оказаться применение вспомогательных индукционных машин.

В случае если от системы требуется большой начальный вращающий момент и меньший рабочий момент, может быть применена схема, изображенная на рис. 232,¹ представляющая собой вариант схемы по рис. 230 и отличающаяся применением реостата со смешанным сопротивлением.

По этой схеме для получения хороших пусковых характеристик в роторы двигателей сперва включается активное сопротивление, которое после раз-

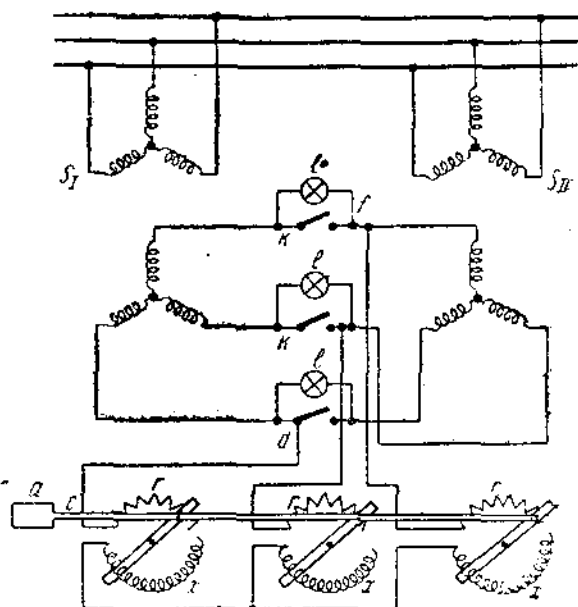


Рис. 232.

¹ Авторское свидетельство № 29538 от 31 марта 1933 г. на имя автора.

тона двигателей (когда вращающий момент может быть снижен) заменяется реактивным, несколько ухудшающим характеристики двигателей, но вместе с тем поглощающим меньше энергии.

Таким образом двигатели пускаются при помощи активного сопротивления, которое постепенно выводится, в то время как реактивное вводится в соответствующей пропорции. Конечно, в любой момент манипулирования обоими сопротивлениями необходимо, чтобы на зажимах такого комбинированного напряжения имела место разность напряжения, достаточная для получения синхронизирующего момента.

Каждая фаза реостата для этой схемы состоит из двух частей r (активной) и x (реактивной), занимающих каждая (или, вернее, контакты каждой) половину окружности. По контактам указанных сопротивлений скользит поворотный около своей средней точки двухсторонний рычаг c , находящийся под воздействием тяги a .

Схема дает большой начальный момент и надежную синхронность вращения двигателей, число которых может быть взято любым.

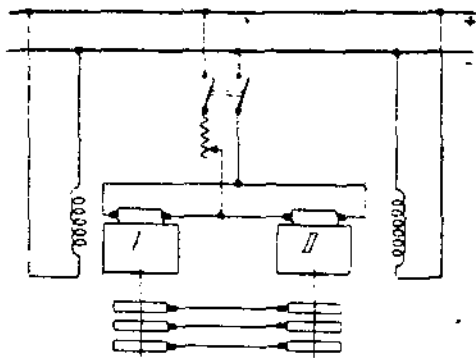


Рис. 233.

Недостатками схемы являются несколько ухудшенные характеристики двигателей во время работы и громоздкость реостата.

182. Схемы для получения синхронного вращения машин постоянного тока. Идея совмещения вспомогательных машин с приводными электрическими двигателями может быть осуществлена не только для асинхронных приводных двигателей, но также и для машин постоянного тока.

Последняя представляет собой по существу синхронную машину и поэтому-то, как известно, агрегат

из синхронной машины и машины постоянного тока может быть совмещен в одну машину — одноякорный преобразователь (машину двойного тока), имеющий одну обмотку, соединенную и с коллектором и с зажимами переменного тока (контактные кольца). В таком случае указанная машина приобретает свойства синхронной машины.

Схема синхронной связи между машинами постоянного тока получается из схемы на рис. 217 путем совмещения синхронной вспомогательной машины с приводным двигателем постоянного тока (рис. 233). Свойства систем по рис. 217 и 233 будут весьма близки, в силу чего общим окажется и основной недостаток, который уже указывался для схемы по рис. 217, а именно отсутствие синхронизации при пуске, остановке и малых числах оборотов. Если обмотки якорей двигателей постоянного тока по рис. 233 занимают в пространстве одинаковое положение (машины идентичны и нагрузки одинаковы), то в цепи колец тока не будет, так как обратные э. д. с. якорей уравновешивают друг друга. При увеличении на одном из валов (например машины I) нагрузки якорь более нагруженного двигателя сдвинется против направления вращения на угол θ относительно якоря менее нагруженного двигателя. В силу этого э. д. с. первого будет запаздывать по фазе на угол θ относительно э. д. с. второго, что соответственно дает для более нагруженного

двигателя режим синхронного двигателя, а для менее нагруженного — режим синхронного генератора (см. рис. 173), причем энергия будет передаваться через кольца от машины II к машине I. Таким образом, машина I будет получать энергию и через коллектор и через кольца, работая одновременно и как двигатель постоянного тока и как синхронный двигатель. Машина же II окажется частично в режиме двигателя постоянного тока, частично же в режиме одноякорного преобразователя, преобразующего получаемый из сети постоянный ток в переменный и посылающего его через кольца в якорь более нагруженной машины I.

Для этого случая можем написать:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= UI_1 + P_3; \\ P_2 &= UI_2 - P_3. \end{aligned} \right\} \quad (250)$$

где P_1 и P_2 — мощности, получаемые каждой машиной как со стороны коллектора, так и со сторон колец; U , I_1 , I_2 — напряжение и токи сети постоянного тока; P_3 — мощность переменного тока, передаваемая через кольца.

Далее получим:

$$P_3 = \frac{1}{2} [(P_1 - P_2) + (UI_2 - UI_1)]. \quad (251)$$

Полагая

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{\kappa 1} + Q_1, \\ P_2 &= P_{\kappa 2} + Q_2, \end{aligned}$$

где $P_{\kappa 1}$ и $P_{\kappa 2}$ — мощности на валу каждого двигателя, а Q_1 и Q_2 — потери в двигателях, напомним

$$P_3 = \frac{1}{2} [(P_{\kappa 1} - P_{\kappa 2}) + (Q_1 - Q_2) + (UI_2 - UI_1)]. \quad (252)$$

При одинаковых машинах $UI_2 = UI_1$, так как возбуждение и числа оборотов одинаковы. Поэтому

$$P_3 = \frac{1}{2} (P_1 - P_2). \quad (253)$$

Следовательно, менее нагруженная машина передает более нагруженной половину разности нагрузок.

Таким образом, при возникновении разницы в моментах (например, при увеличении нагрузки на валу одного из двигателей) каждая из машин начинает получать из сети постоянного тока дополнительную мощность, равную половине разности мощностей на валу этих машин (кроме того плюс некоторая мощность на увеличение потерь), для чего каждая из этих машин должна в равной мере снизить свои обороты, т. е. продолжать по отношению друг к другу вращаться синхронно.

Для уменьшения синхронизирующих токов между двигателями I и II может быть также применено перекрещивание сермисных обмоток (в коммутационных двигателях), как это изображено на рис. 234.

При возрастании нагрузки на валу одного из двигателей ток в его якоре увеличится при соответствующем уменьшении числа его оборотов. Вместе с тем число оборотов снизится и у другого двигателя, так как увеличившийся ток первого двигателя вызовет увеличение потока во втором двигателе.

Однако без синхронной связи через кольца поддержание одинакового числа оборотов при помощи перекрещивания серийных обмоток было бы лишь приблизительным.

При включении двух или нескольких двигателей постоянного тока на значительном расстоянии друг от друга напряжение на их зажимах может оказаться благодаря падению напряжения в линии несколько неодинаковым, что обусловит появление синхронизирующих токов между кольцами и при одинаковых моментах на валу двигателей.

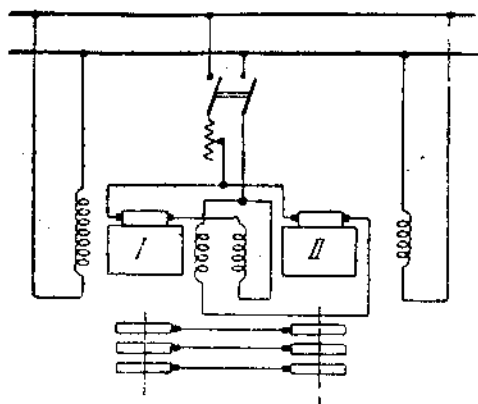


Рис. 234.

В этом случае может быть применено последовательное соединение двигателей (рис. 235). Однако при такой схеме во избежание периодических коротких замыканий сети постоянного тока через кольца B_1 и B_2 (это может происходить в тот момент, когда под щетки подходят проводники, соединенные с кольцами) нужно соединить указанные кольца не непосредственно, а через трансформатор T , с коэффициентом трансформации равным единице,

позволяющий электрически разобщить кольца B_1 от колец B_2 .

Надлежит отметить, что, за исключением периодов пуска и остановки, а также случая широкого регулирования числа оборотов двигателей путем изменения напряжения на их зажимах, системы по рис. 233—235 работают в отношении синхронности вращения весьма надежно.

183. Схема для синхронного вращения двигателей с улучшенной коммутацией. Приведенные на рис. 233—235 схемы, в особенности при больших машинах, имеют тот недостаток, что двигатели при колебаниях нагрузки работают неудовлетворительно в отношении коммутации. Это объясняется наличием в якорях синхронизирующих переменных токов, колеблющихся по своей величине при изменении нагрузки и вызывающих меняющиеся искажения поля машины. (Реакция от синхронизирующих токов не компенсируется обычной обмоткой на добавочном полюсе.) Для устранения этого необходимо создать дополнительное коммутирующее поле, пропорциональное меняющимся синхронизирующим токам.

С этой целью может быть применена ¹ (рис. 236) машина, выполненная по типу преобразователя частоты без обмотки на статоре. Указанная

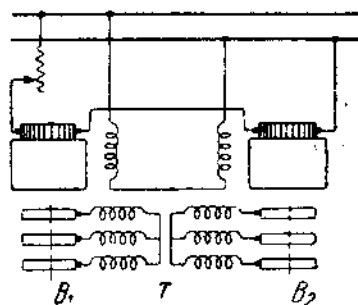


Рис. 235.

¹ Герм. патент № 420507 S.—S. W.

машина имеет число полюсов одинаковое с числом полюсов одного из двигателей системы, например двигателя II, и насажена на вал последнего.

К контактным кольцам s машины U через сериесный трансформатор T подводится напряжение переменного тока, пропорциональное по своей величине синхронизирующему току между двигателями. С коллектора машины U снимается постоянный ток, который возбуждает специальные обмотки на добавочных полюсах обеих машин, создавая коммутирующее поле, пропорциональное по своей величине синхронизирующему току между машинами.

184. Сравнение величины углов смещения осей при электрическом и механическом их соединении. Электрическую синхронную связь между валами иногда называют электрическим валом, имеющим, так же как и обычный механический вал, угол скручивания θ . Интересно сравнить численное значение угла θ для механического и электрического валов.

Как уже было отмечено, на величину угла θ последнего влияет тип синхронной связи. В частности угол θ значительно меньше, при одном и том же тормозящем моменте, в случае применения синхронных вспомогательных машин, индукционных машин с вращением против поля, машин постоянного тока с кольцами для синхронизирования, чем в группе индукционных машин с вращением по полю (рис. 228, 230 и 232). Сравним угол скручивания механического вала с углом θ первой группы как наиболее распространенной, в частности схемы с индукционными вспомогательными машинами при вращении их роторов против поля (рис. 218).

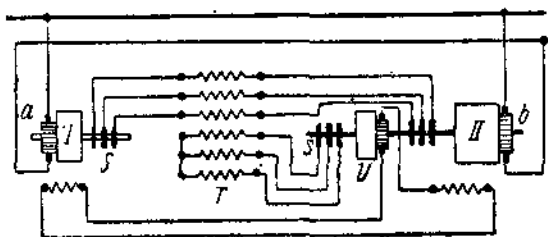


Рис. 236.

Как показывают исследования, в среднем для разности в моментах на валах двигателей, равной 100% от нормального момента, угол θ составляет в электрических градусах около 13° .

Для четырехполюсной машины это дает угол в 6,5 пространственных градусов, а для шестиполюсной — около 4° .

Для весьма длинных механических валов получаются величины угла скручивания значительно большие, в особенности если принять во внимание при быстроходных электрических двигателях синхронной связи передачу между двигателями и рабочим механизмом, которая, уменьшая число оборотов, одновременно уменьшает и угол скручивания. Для механического вала угол скручивания может быть определен по формуле:

$$\theta = -\frac{M_d}{GJ_p} \cdot L, \quad (254)$$

где L — длина вала в см, M_d — передаваемый вращающий момент в кгсм, G — модуль скольжения в кг/см², J_p — полярный момент инерции в см⁴; для круглого сечения его величина равна $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$.

При определенном допустимом напряжении k_d кг/см² вращающий момент пропорционален кубу диаметра (d в сантиметрах)

$$M_d = \frac{\pi d^3}{16} k_d \text{ кг.см.}$$

Отсюда

$$\vartheta = \frac{2L k_a}{G \cdot d}. \quad (255)$$

Следовательно, угол скручивания при данных длине вала и допустимом напряжении обратно пропорционален диаметру вала.

Для $k_a = 600 \text{ кг/см}^2$, $G = 8,5 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$ и длины в 100 м угол скручивания равен следующему выражению:

$$\vartheta = 14,1 \cdot \frac{1}{d} \text{ в радианах.}$$

Для вала диаметром в 100 мм величина ϑ , следовательно, при допустимом напряжении в 600 кг/см^2 составляет 1,41 в радианах или 81° .

Если взять вал двойной толщины, т. е. в 4 раза тяжелее, то при том же вращающем моменте и при такой же длине L напряжение уменьшается до $1/8$, т. е. до 75 кг/см^2 (весьма малое напряжение). Угол скручивания составит тогда $1/16$ от 81° , т. е. $5,1^\circ$. В схеме синхронной связи для шестиполусной машины ($n_0 = 1000 \text{ об/мин}$) угол ϑ равен примерно 4° для 100% разницы нагрузки, причем его величина практически не зависит от расстояния между машинами. Часто скорость рабочего механизма бывает раз в десять меньше скорости приводного двигателя. Тогда угол ϑ для самого механизма будет составлять лишь $0,4^\circ$ для синхронной передачи по сравнению с углом $\vartheta = 5,1^\circ$ для весьма тяжелых валов.

Таким образом схемы синхронной связи даже и в этом отношении оказываются совершеннее непосредственной механической связи, что обеспечивает им в ближайшем будущем еще большее распространение во всех отраслях техники.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ СХЕМА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ДЕМОНСТРИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Лабораторное исследование разобранных выше режимов индукционных машин трехфазного и однофазного тока (машина двойного питания, синхронный поворот и синхронное вращение) может быть довольно просто выполнено при помощи различных комбинаций из двух трехфазных асинхронных машин с кольцами.

Кроме того, изучение указанных специальных режимов, обычно не получающих достаточного освещения в общих курсах, позволяет объединить главнейшие режимы бесколлекторных машин переменного тока в одной практической лабораторной схеме с двумя асинхронными машинами и двумя или одной вспомогательными машинами постоянного тока. Подобная схема, по идее автора, выполнена в лаборатории электрических машин Военной электротехнической академии им. тов. Буденного¹ и является, насколько известно автору, первой схемой подобного рода.

Эта схема дает возможность, путем соответствующих простых переключений, подытожить общий и специальный курсы электрических машин переменного тока, сведя в одну систему все явления, происходящие в машине переменного тока при работе ее в различных режимах.

Так, могут быть осуществлены следующие режимы:

1) Синхронный поворот на трехфазном токе, 2) синхронное вращение двух валов („электрический вал“), 3) синхронное вращение двух асинхронных двигателей при разных нагрузках, 4) синхронная передача на однофазном токе, 5) двигатель двойного питания от одной и двух сетей при вращении полей в разные стороны (синхронный режим), 6) то же, что и в п. 5, но для асинхронного режима, 7) двигатель двойного питания от одной и двух сетей при вращении полей в одну сторону (синхронный режим), 8) то же, что и в п. 7, но для асинхронного режима, 9) система для измерения пусковых моментов двигателей (метод Брюдерлина), 10) система для передачи мощности из одной сети в другую той же частоты, что и первая, 11) преобразователь частоты Штейнмеца (режим двигателя и генератора), 12) каскад двух асинхронных двигателей, 13) нормальный режим асинхронного двигателя, 14) асинхронный генератор, 15) одноосное включение, 16) каскад асинхронных двигателей при одноосном включении одного из них, 17) питание асинхронного двигателя с ротора, 18) синхронный трехфазный двигатель, 19) синхронный одно-

¹ Схема в монтажном отношении разработана в большей своей части инж. лаборатории А. С. Коганом.

фазный двигатель, 20) асинхронный однофазный двигатель, 21) трехфазный индукционный регулятор, 22) индукционный однофазный регулятор, 23) безреостатный пуск асинхронного двигателя, 24) синхронное вращение двигателей постоянного тока со вспомогательными машинами.

Сопоставление отдельных режимов дает подтверждение правильности общего взгляда на любую машину переменного тока как на машину двой-

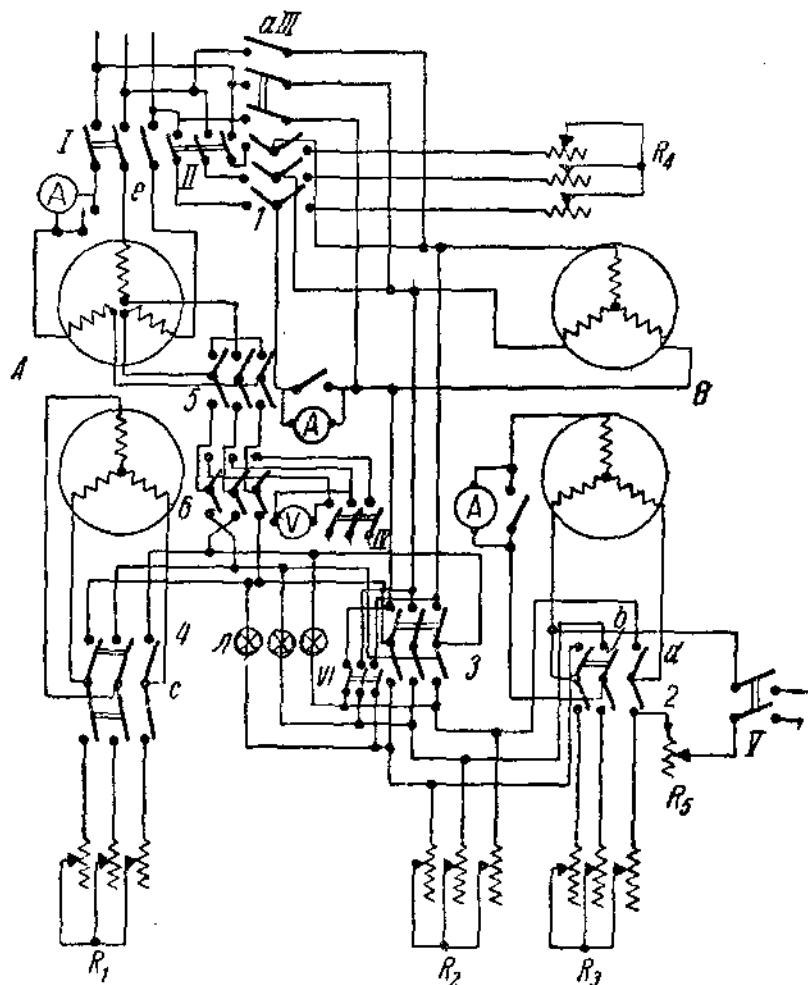


Рис. 237.

ного питания, работа которой может быть охвачена общими выражениями и круговыми диаграммами. Весьма существенным с этой точки зрения является выявление при изучении отдельных включений индукционной машины общности процесса преобразования частоты в синхронной и асинхронной машинах и передачи мощности со статора на ротор и наоборот, а также преобразования части электрической мощности в механическую.

Для выполнения указанных режимов может быть применена практиче-

ская схема, изображенная на рис. 237. В схеме, включающей в себе две асинхронных машины *A* и *B*, требуемые переключения могут быть осуществлены при помощи трехфазных перекидных рубильников 1, 2, 3, 4 и нескольких обычных рубильников I, II, III. . . Валы машин *A* и *B* можно связать с валами машин постоянного тока или с тормозом. Между собой указанные машины, в зависимости от типа режима, соединяются или только электрически или электрически и механически.

Примерное расположение машин схемы на станде изображено в плане на рис. 238.

Машины *A* и *B* могут быть механически соединены между собой при помощи ремня. Вал машины *A*, кроме того, соединен с валом дискового тормоза T_1 и расцепляющейся муфтой m_1 с валом машины постоянного тока M_1 . Вал тормоза T_1 должен быть снабжен съемной червячной передачей для осуществления синхронного поворота. Машина *B* может быть соединена или ременной передачей с двигателем постоянного тока M_2 , для чего она

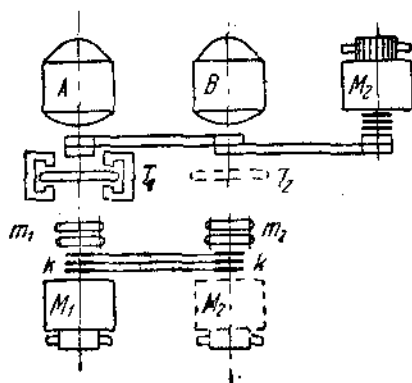


Рис. 238.

снабжается широким шкивом, или же точно таким же образом — с тормозом T_2 и двигателем M_2 , как и машина *A* (на рис. 238 положение второго агрегата в этом случае показано пунктиром).

Конечно, можно всю систему расположить и в одну линию, повернув второй агрегат из положения, изображенного пунктиром, на 180° так, чтобы можно было связывать машины *A* и *B* механически при помощи расцепляющейся муфты со стороны, противоположной шкивам. Однако для этого необходимо специально удлинить с указанной стороны валы машин *A* и *B*.

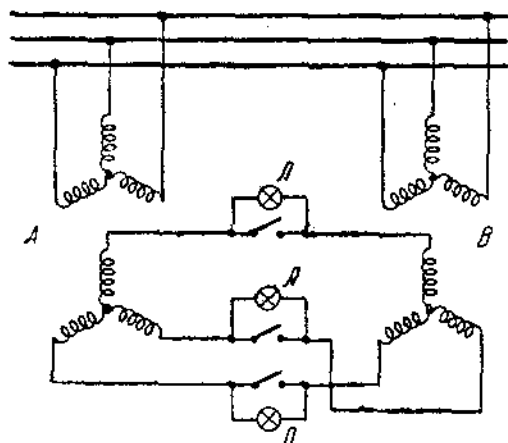


Рис. 239.

Рассмотрим вкратце схемы отдельных режимов из перечисленных выше и те манипуляции в универсальной схеме, которые необходимо произвести для получения этих режимов.

1. ГРУППА РЕЖИМОВ ПРИ ВРАЩЕНИИ ПОЛЕЙ В ОДНУ СТОРОНУ.

Принципиальная схема изображена на рис. 239. Для включения роторов машин *A* и *B* во избежание больших толчков тока могут быть применены, как и при параллельном включении обычных синхронных машин,

синхронные лампы L , при помощи которых, путем соответственного поворота одного из роторов, находят положение совпадения осей роторов машин в пространстве.

а) **Синхронный поворот.** Схема по фиг. 239 по существу представляет собой схему синхронного поворота (а также включение Брюдерлина через трансформатор), но вместе с тем она может быть использована и для демонстрации родственных режимов.

Для измерения статических моментов в схеме синхронного поворота у тормоза T_1 машины A должна быть установлена червячная передача (съемная) и отсчетный диск, а на валу машины B установлен рычаг с динамометром, весами и т. п. для измерения моментов.

б) **Синхронное вращение с одним приводным двигателем.** Если механически соединить (например при помощи ремня) вал одной из машин (например машины B) с валом двигателя постоянного тока M_2 , то можем исследовать трехфазную индукционную систему синхронной передачи при вращении по полю и против поля („электрический вал“). В этом случае вал второй машины (принимающей) можно соединить с каким-либо тормозом, например электромагнитным, для задавания различных нагрузок при снятии рабочих характеристик.

с) **Синхронное вращение двигателей постоянного тока со вспомогательными машинами.** Машин A и B при той же схеме (рис. 239) механически соединяются с двигателями постоянного тока, пускаемыми от общего реостата. Нагрузка на вал каждого из агрегатов дается при помощи тормозов T_1 и T_2 (рис. 238). Наиболее характерным является случай отсутствия нагрузки на валу одного из агрегатов.

Если один из двигателей постоянного тока соединить со вспомогательной машиной через ремень, то синхронность вращения двигателей M_1 и M_2 будет приближительной.

д) **Машина двойного питания от двух сетей с различными частотами при вращении полей в одну сторону.** В схеме синхронного вращения по пп. б и с по существу каждая из машин A и B работает как машина двойного питания от двух сетей с различными частотами при вращении полей в одну сторону. Действительно, возьмем, например, машину B . Статор ее присоединен к сети с неизменной частотой, а ротор — к преобразователю частоты, которым для него является машина A . Процессы, происходящие в машине B , совершенно одинаковы с процессами, рассмотренными нами в главе, посвященной двигателям двойного питания.

В случае вращения по полю на роторе частота будет меньше, чем на статоре, причем в ведомой машине энергия поступает на статор (из сети с большей частотой) и частично передается на ротор (в сеть с меньшей частотой), а частично преобразуется в механическую энергию, развиваемую машиной B как двигателем. В передатчике A протекание энергии будет происходить обратным порядком. (Двигатель B как бы вращается за счет разности частот на статоре и роторе.)

При вращении системы против поля частота на роторе больше, чем частота на статоре. Поэтому вращение машины B , рассматриваемой как двигатель двойного питания, происходит против вращения поля статора. В этом случае, так же как и в первом, энергия при работе машины B в режиме двигателя поступает из сети с большей частотой (на ротор) и частично отдается в сеть с меньшей частотой (на статор), а частично превращается в механическую энергию.

Для сопоставления этой схемы с более наглядной схемой машину *В* в качестве машины двойного питания можно обмоткой ротора приключить не к ротору машины *А*, а к отдельному синхронному генератору, вращаемому с различной скоростью от двигателя постоянного тока, что позволит исследовать указанный режим в действительной обстановке и убедиться, что с точки зрения процессов, происходящих в машинах, обе схемы эквивалентны.

е) **Асинхронный режим машины двойного питания при вращении полей в одну сторону.** Если развернуть от двигателя постоянного тока ротор, например, машины *В* при заторможенном роторе машины *А* в сторону вращения поля статора и затем отключить от сети двигатель постоянного тока, то машина *В* будет работать в асинхронном режиме двигателя двойного питания при вращении полей в одну сторону. При разворачивании против поля, благодаря большому синхронизирующему моменту для машины *В* (см. рис. 157), последняя может не пойти и через некоторое время остановится. Асинхронный режим можно также получить, особенно в случае машин небольшой мощности, путем резкого поворота передатчика против поля. (Нужно учесть то обстоятельство, что здесь будут иметь место большие токи, порядка токов короткого замыкания).

Для получения общей для всех приведенных режимов схемы (рис. 239) необходимо в универсальной схеме произвести следующие манипуляции:

Замыкаются рубильники *I* и *III*; переключатели же: 4 — замыкается вверх, 3 — вниз и 2 — вверх. Остальные рубильники и переключатели разомкнуты. Реостат R_2 выводится весь, т. е. размыкается. Если желательно получить вращение машин в разные стороны, то замыкается рубильник *II*, а переключатель *I* ставится в левое положение. (Рубильник *III*, конечно, предварительно размыкается). Соответственно нужно пересоединить провода ротора. Асинхронный режим при вращении полей в одну сторону можно получить и при последовательном соединении обмоток машины *А* по схеме Брюдерлина (о схеме см. п. 5с). В этом случае после выполнения схемы Брюдерлина машину разворачивают от двигателя M_2 в ту или другую сторону.

2. СИНХРОННОЕ ВРАЩЕНИЕ ДВУХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

Этот режим весьма просто получается из режима по п. 1а, путем замыкания пускового реостата R_2 , выводимого в дальнейшем лишь частично. Для нагрузки на оба двигателя служат электромагнитные тормоза T_1 и T_2 . Муфты m_1 и m_2 , связывающие машины *А* и *В* с машинами постоянного тока M_1 и M_2 , должны быть разъединены. Можно, наоборот, оставить тормоза T_1 и T_2 невозбужденными, а сцепить муфты m_1 и m_2 , чтобы производить нагрузку на двигатели *А* и *В* при помощи машин постоянного тока.

3. СИНХРОННАЯ ПЕРЕДАЧА НА ОДНОФАЗНОМ ТОКЕ.

Синхронная передача на однофазном токе получается из схемы по п. 1а (рис. 239) при размыкании одной фазы главных рубильников схемы *I* и *III* (муфты *е* и *а*), что обуславливает возникновение в машинах *А* и *В* пульсирующих потоков вместо вращающихся.

4. МАШИНА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ПРИ ВРАЩЕНИИ ПОЛЕЙ В РАЗНЫЕ СТОРОНЫ.

а) Синхронный режим. Для получения вращения полей в разные стороны включают рубильники *I* и *II* вместо рубильника *III* и ставят в левое положение переключатель *1*, что дает изменение порядка следования фаз на статоре машины *B*. Последнюю нужно развернуть в сторону вращения поля статора при помощи двигателя M_2 до двойной синхронной скорости и, синхронизировав, пользуясь лампами *L*, приключить при помощи переключателя *3* (нижнее положение) обмотку ротора машины *B* к обмотке ротора машины *A*, которая в этом случае играет роль обычного трансформатора (ротор ее должен быть заторможен).

Убедиться в различном порядке следования фаз на статоре и роторе машины двойного питания *B* можно при помощи синхронных ламп, которые при покое машин *A* и *B* и повороте ротора последней должны показать несоответствие порядка своего загорания со схемой, по которой они включены для синхронизирования.

Направление вращения поля статора машины *B* можно установить, пуская указанную машину обычным асинхронным двигателем, для чего надлежит замкнуть рубильник *II*, переключатель *1* поставить в левое положение, а переключатель *2* — в нижнее. Пуск в этом случае производится от реостата R_3 .

Можно также осуществить пуск машины *B* и со стороны ротора при помощи реостата R_4 в статоре (при обратном следовании фаз на роторе вращение двигателя будет происходить в ту же сторону, т. е. в сторону вращений поля статора при первом включении). Для питания с ротора надлежит переключатель *4* поставить вверх, *3* — вниз, *2* — вверх, *1* — вправо, рубильник *I* замкнуть, а рубильник *II* — разомкнуть.

Перевод машины двойного питания из режима двигателя в режим генератора осуществляется при помощи соответственного изменения возбуждения машины M_2 , приключенной к сети постоянного тока.

б) Асинхронный режим. Машина *A* выполняет попрежнему роль трансформатора, а машина *B* — двигателя. Последний сперва пускается как двигатель ординарного питания при помощи реостата R_3 . При этом замыкаются рубильник *II*, переключатель *1* — в левое положение и переключатель *2* — вниз.

Кроме того, должны быть включены рубильник *I* и переключатель *4* — вверх, *3* — вниз (реостат R_4 должен быть разомкнут).

После разворачивания двигателя *B* переключатель *2* быстро переключают в верхнее положение. Асинхронный режим двигателя двойного питания может быть получен и при последовательном соединении обмоток статора и ротора машины *A* (о схеме см. п. 5с).

5. ГРУППА РЕЖИМОВ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ПИТАНИИ АСИНХРОННЫХ МАШИН.

К этой группе относятся как режимы обычных асинхронных машин, так и режимы их каскадных соединений друг с другом.

а) Режимы асинхронного двигателя и генератора. Включения для режимов нормальной асинхронной машины собственно уже были приведены при указании схемы для двигателя двойного питания при вращении полей в разные стороны. Таким образом при питании со статора над-

лежит включить рубильник *III*, переключатель *1* разомкнуть, а переключатель *2* поставить в нижнее положение. В случае же питания с ротора (через трансформатор, роль которого выполняет машина *A*) должно переключатель *4* поставить вверх, *3* — вниз, *2* — вверх, *1* — вправо, рубильник *I* — замкнуть, а рубильник *II* разомкнуть (реостат R_2 разомкнуть).

Перевод из режима двигателя в режим генератора машины *B* осуществляется воздействием на возбуждение машины M_2 , приключенной к сети постоянного тока.

Переход к однофазному асинхронному двигателю осуществляется путем размыкания одного ножа *a* рубильника *III*.

Одноосное включение может быть получено размыканием одного ножа *d* переключателя *2* во вторичной цепи машины *B* (в первичной цепи ее все ножи рубильника *III* включены).

Кроме того, переходя с рубильника *III* на *II* — *I*, можно демонстрировать реверсирование трехфазного двигателя.

б) Каскад асинхронных машин. Валы двигателей *A* и *B* механически соединяются, например, при помощи ременной передачи (рис. 238), которая при других испытаниях снимается.

Нагрузка задается при помощи тормозов T_1 и T_2 или машин M_1 и M_2 . Для получения схемы каскада (рис. 240) надлежит проделать следующие манипуляции. Переключатели *3* и *4* ставятся вверх, *2* — вниз, *1* — разомкнут. Рубильник *I* замкнут, а *II* и *III* — разомкнуты. Пуск производится при помощи реостата R_3 .

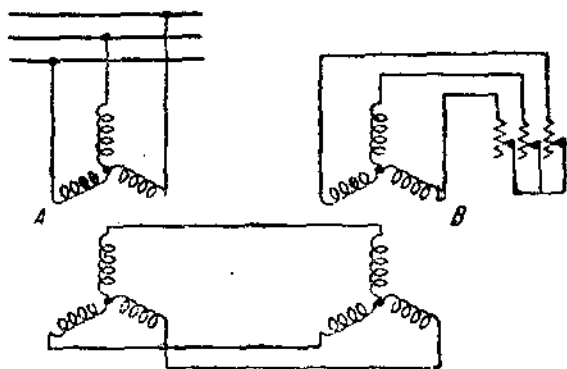


Рис. 240.

Можно также замкнуть на реостат не ротор машины *B*, а статор, что обычно в каскадах и имеет место. (Пуск тогда производится от реостата R_4 .)

Для осуществления каскада асинхронных двигателей при одноосном включении одного из них надлежит перед пуском разомкнуть нож *d* переключателя *2* (или нож переключателя *1* при замыкании на реостат статора). В остальном схема остается та же, что и при обычном каскаде.¹

с) Безреостатный пуск асинхронного двигателя. Безреостатный пуск может быть осуществлен путем последовательного соединения при пуске обмоток статора и ротора² машины *A*, для чего последняя должна иметь выведенными все шесть концов, из которых три могут быть при помощи переключателя *5* или замкнуты в нулевую точку или присоединены (через переключатели *4* и *б*) к обмотке ротора.

¹ О работе каскадов обоих типов — см. книгу К. И. Шенфера, Асинхронные машины, 1934, гл. XXIII.

² См. статью Г. И. Штурмана, Асинхронный двигатель при последовательном включении статора и ротора. Журн. „Электричество“, № 5, 1935 г., стр. 27.

Указанные обмотки должны быть последовательно соединены с обратным следованием фаз, чтобы получить асинхронный режим двигателя двойного питания с вращением полей в разные стороны. При одинаковом порядке следования фаз будет иметь место машина двойного питания по схеме Брюдерлина (число оборотов равно нулю) с последовательным соединением обмоток. После разгона машины *A* как двигателя двойного питания в асинхронном режиме переход к режиму обычного двигателя осуществляется одновременным переключением переключателя 5 — вверх, а переключателя 4 — вниз (реостат R_1 при этом должен быть целиком выведен, чтобы образовать вторую нулевую точку для обмотки ротора машины *A*).

6. ИНДУКЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР.

Машина *A* может быть превращена в индукционный регулятор с первичной обмоткой на роторе и вторичной на статоре. Так как обмотка ротора машины *A* рассчитана на меньшее напряжение, чем напряжение сети, то ее надлежит присоединить к сети через трансформатор, роль которого выполняет машина *B*.

Таким образом мы получаем схему индукционного регулятора в общем виде, т. е. с возбудительным трансформатором¹ (см. рис. 241, где *A* — индукционный регулятор, а *B* — возбудительный трансформатор).

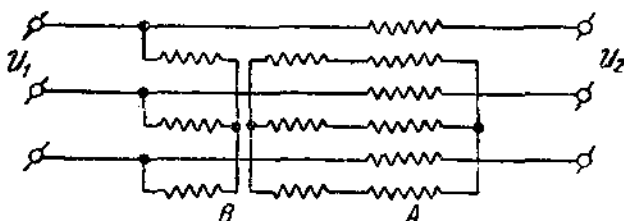


Рис. 241.

Для выполнения схемы надлежит замкнуть рубильники *I* и *III* и поставить переключатели следующим образом: 5 — вниз, 6 — вверх, 4 — вверх, 3 — вниз, 2 — вверх. Реостат R_2 должен быть разомкнут.

Регулируемое напряжение измеряется при помощи вольтметра *V*.

Для включения трехфазной нагрузки может быть применен рубильник *IV*.

Однофазный регулятор получается путем размыкания одной фазы статоров машин *A* и *B*.

7. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (СИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ).

Предварительно машина *B* пускается как обычный асинхронный двигатель от реостата R_2 (замкнуть рубильник *III*, переключатель 2 — вниз, остальные рубильники и переключатели разомкнуты). После разгона двигателя *B* и замыкания накоротко реостата R_2 одновременно размыкают два ножа *b* переключателя 2 и замыкают рубильник *V* для подачи в две последовательно соединенные фазы обмотки ротора постоянного тока, синхронизируя тем самым указанный двигатель.

¹ H. F. Schait, Der Drehstrom-Induktionsregler, 1927, S. 319 и Abb. 118.

Перед пуском необходимо отрегулировать силу постоянного тока при помощи реостата R_5 при замкнутом накоротко реостате R_3 и разомкнутых ножах b .¹

Однофазный синхронный двигатель получается при размыкании одной из фаз статора машины B .

8. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ШТЕЙНМЕЦА.²

Как уже отмечалось, режим работы указанного преобразователя подобен режиму работы машины двойного питания от сетей различной частоты и при вращении полей в одну сторону. Для осуществления схемы преобразователя, представляющего собой каскад асинхронной машины с синхронной,

надлежит одну из машин A или B превратить в синхронную машину.

В данной схеме асинхронной машиной служит машина A , ротор которой механически связывается с ротором синхронизированной машины B (рис. 242).

Предварительно включают рубильник I (переключатель 5 замкнут вверх), переключатель 4 ставят вверх, замыкают рубильники V и VI и вниз — нож a переключателя 2. Далее разворачивают агрегат от двигателя

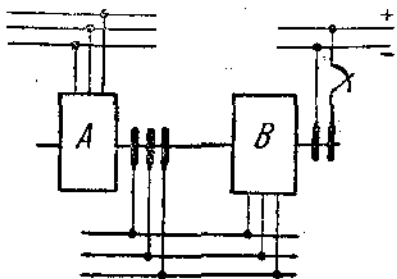


Рис. 242.

постоянного тока, устанавливают равные напряжения у машин A и B (судят по лампам) и включают переключатель 3 вверх. (Можно также производить разворачивание агрегата, пуская машину A асинхронным двигателем.)

В качестве нагрузки для преобразователя может служить реостат R_4 .

9. ОСТАЛЬНЫЕ СХЕМЫ.

Для демонстрации передачи энергии из одной сети в другую той же частоты одна из машин, например A , включается одной обмоткой на сеть, а другой к специальному лабораторному синхронному генератору, причем порядок следования фаз в обеих обмотках берется одинаковым (схема Брюдерлина). Тогда поворотом ротора машины на некоторый угол в ту или иную сторону можно передавать мощность из одной сети в другую, о чем особенно наглядно будут свидетельствовать показания амперметра в цепи двигателя постоянного тока, приводящего во вращение указанный лабораторный генератор.

Снабжая машины M_1 и M_2 кольцами K (рис. 238), можем получить схему синхронного вращения машин постоянного тока.

Очевидно, что не все из приведенных схем являются вполне нормальными рабочими схемами той или иной из рассматриваемых систем. Некоторые из них позволяют установить в основном лишь принципиальную сторону демонстрируемого режима.

¹ О величине нормального тока возбуждения синхронизированного асинхронного двигателя см., например, статью И. М. Якименко, Синхронизирование асинхронных двигателей, журн. „Электричество“, 1932 г., № 23—24, стр. 1043.

² Arnold, W.S.T., V. 1, S. 520.

ГЛАВНЕЙШАЯ ЛИТЕРАТУРА.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ В СХЕМАХ С МЕНЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТОЙ И СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ.

А. ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ.

1. Arnold. WST, Bd. V—2, стр. 163—173.
2. Rüdenberg. Die Kommutierung in Drehstromkollektormaschinen E. u. M. 1911, S. 467.
3. Scherbius. Mehrphasenkollektormaschinen zur Regelung von Drehstrommotoren ETZ 1911, S. 871.
4. Niehammer u. Siegel. Kompensierte Drehfeld-Kommutatormaschinen mit Nebenschlusscharakteristik E. u. M. 1911, S. 871.
5. Pauly. Electric drive for steel mill main rolls. GER 1919, p. 309.
6. Pauly. Some methods of obtaining adjustable speed with electrically driven rolling mills. GER 1921, p. 422.
7. Seitz. Die Regelung der Drehzahl von Induktionsmotoren im unter- und übersynchronen Gebiet nach System Brown-Boveri—Scherbius. E. u. M. 1924, S. 109, 128.
8. Kozisek. Drehstromregelsätze mit Läufertremderregung. ETZ. 1926, S. 989.
9. Schenkel. Die Kommutatormaschinen für ein und mehrphasigen Wechselstrom, Berlin u. Leipzig, Walter de Gruyter 1924.
10. Kozisek. Drehstromerregemaschine mit Fremderregung. ETZ 1925, S. 142; 715.
11. М. П. Костенко. Компенсированный коллекторный многофазный альтернатор с круговым вращающимся полем и независимым возбуждением переменного тока. „Электричество“ 1925 г. стр. 417.
12. Schmitz. Die Kommutierung der Kollektorphasenschieber. ETZ 1925, S. 519.
13. Japolsky and Press. The Production and Use of Variable-Frequency Currents. Engineering 1926, p. 31; 99; 158.
14. Heyland. Mehrphasen-Kollektormaschinen mit Drehfeld und Wendefeldern. ETZ 1927, S. 673.
15. Heyland. Neues Verfahren zum Regeln von Asynchronenmaschinen mit Mehrphasen Kollektormaschinen. ETZ 1928, S. 385.
16. Heyland. Selbsteregte mehrphasige Reihenschluss—Erregemaschinen und die Rolle ihrer Ständerwicklungen.
17. Seitz. Wechselstrom-Kommutatormaschinen. Starkstromtechnik I, Berlin Ervst & Sohn, 1930.
18. М. Р. Костенко. Die Mehrphasigen Kollektor- und Induktionsmaschinen als Sonderfall des „allgemeinen Transformators“. A. f. E. 1930, S. 413.
19. Dreyfus. Kommutatorkaskaden und Phasenschieber. Berlin, Julius Springer, 1931, S. 27—37.
20. Ф. А. Демьянов. Каскад по Шербиусу. „Электричество“ 1931 г., стр. 119—124.
21. К. И. Шенфер. Коллекторные двигатели переменного тока 1931 г.
22. А. Г. Белявский. Механические выпрямители, 1933 г.
23. Проф. М. П. Костенко. Коллекторный компенсированный альтернатор с плавной и явнопольной системой возбуждения переменного тока. „Сборник ЛЭМИ“ 1934 г., № 4.

1. K. Pichelmayer. Ermittlung der Querfeldspannung bei synchronen Einzelpolmaschinen durch den Versuch. E. u. M. 1910, S. 809.
2. M. Wengner. Theoretische und experimentelle Untersuchungen an der synchronen Einphasen-Maschine. 1910.
3. E. Jasse. Über Synchronmotoren ohne Erregung. A. f. E. 1913, S. 26.
4. Arnold. WST, Bd. IV.
5. Bentschke. Drehfeld-Synchronmotor ohne Gleichstromerregung. E. u. M. 1914, S. 177, 321, 491.
6. M. de Coninck. Etude du couple dans les machines synchrones à poles saillants non excités. „La Lumière Electrique“ 1914, p. 525.
7. Steinmetz. Theory and calculations of electrical apparatus. Chapter XVI, 1917.
8. Синхронная передача сист. Русск. зап. о-ва Эрикссон 1917 г.
9. I. K. Kostko. Polyphase Reaction Synchronous Motors. JAIEE 1923, p. 1162.
10. I. Kostko. Влияние изменения частоты на характеристики многофазного асинхронного двигателя, The EL 1922 г. сентябрь, т. 89, стр. 286.
11. Brüderlin. Der Drehschub der allgemeinen Reaktionsmaschinen, E. u. M. 1924, H. 37.
12. Brüderlin. Drehfeldmaschinen mit veränderlicher Reaktanz. A. f. E. 1924, Bd. XIII, H. I.
13. Костенко, М. П. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов. „Электричество“ 1925 г., № 2, стр. 87.
14. M. Carlini. Commandes à distance utilisant comme recepteurs des électroaimants ou des moteurs à impulsion. Bulletin de la Société Française des Electriciens 1926, v. IV, № 62, p. 1107—1136.
15. P. und W. Stäblein. Stationäre erzwungene Schwingungen in Schwingungskreisen mit periodisch Veränderlichen Koeffizienten. A. f. E. 1927, Bd. XVIII H. 2, S. 175.
16. Л. М. Пиотровский и В. К. Попов. Испытание машин переменного тока, вып. II, 1927, стр. 107—113.
17. Е. А. Тер-Маркарян. Теоретическое и экспериментальное исследование синхронного реактивного двигателя. „Изв. Ленингр. Политехн. Ин-та“ 1928 г., т. XXXI, стр. 121.
18. F. H. Clough. Доклад № 91 на Второй мировой энергетической конференции 1930 г.
19. T. Orin Carboni. Impianti ed ausiliari elettrici navali. L'Elettrotecnica 1930, № 19, стр. 429.
20. Mc. Clelland. The Application of electricity in warships. JIEE 1927, v. 65, p. 852.
21. Р. Рюденберг. Явления неустановившегося режима в электрических установках 1931 г.
22. А. А. Солодовников. Элементы телемеханики, 1931 г.
23. Проф. Г. А. Люст. Синхронные машины, 1932 г.
24. H. E. Warren. Электрический синхронизатор. Trans. AIEE 1932, № 2, p. 546—555.
25. T. R. Watts. Gearless Clock Motor Based on Vernier Cascade E. W. 1932 April, p. 784.
26. P. H. Trickey. Small Synchronous Motors Without Exciters. The Electric Journal 1933, April № 4, v. 30, p. 160.
27. Midworth and Tagg. Some Electrical Methods of remote indication. JIEE 1933, июль т. 73, p. 34.
28. Е. М. Голдовский. Синхронизация в звуковом кино и телевизии 1933 г.
29. Д. В. Васильев. Электрические двигатели в установках слабого тока. Электрослаботочная промышленность. „Сборник Бюро новизны“, 1934 г., октябрь, стр. 48.
30. L. I. M. Ricard, Edm. Marget, I. L. Routin. Application d'électricité à la marine, 1930.

ИНДУКЦИОННЫЕ МАШИНЫ В СХЕМАХ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ И СХЕМЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ СИНХРОННОГО ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ.

1. H. Gröb. Eine neue Motorschaltung, ETZ 1901, № 10, стр. 211.
2. E. Arnold. WST, Bd. V, S. 573, Doppeltgespaltete Inductionsmaschine.
3. Проф. А. А. Воронцов. Переменные электрические токи в применении к распределению энергии. 1915 г., стр. 513.
4. Проф. В. А. Толвинский. Трехфазный асинхронный двигатель двойного питания. "Электричество" 1923, № 5—6, стр. 274.
5. R. Brüderlin. Eine Methode zur Messung von Anlaufmomenten. E. u. M. 1924, № 5.
6. С. М. Гохберг. Синхронные режимы работы трехфазной индукционной машины при двойном питании от одной и той же сети. "Электричество" 1925 г., № 8, стр. 447.
7. С. М. Гохберг. Асинхронные режимы работы трехфазной индукционной машины при двойном питании от одной и той же сети. "Электричество" 1926 г., № 9, стр. 390.
8. Проф. В. С. Кулебакин и инж. А. Н. Ларионов. Синхронное вращение асинхронных двигателей. "Труды ВЭИ" 1926 г., вып. 12; IV, стр. 17.
9. A. Gundlach u. Otto Sparing. Elektrische Anordnungen zur Sicherung des Gleichlaufs mehrerer Wellen. Siemens — Zeitschr 1927, September H. 9. S. 600.
10. A. Gundlach u. Otto Sparing. Elektrische Anordnungen zur Sicherung des Gleichlaufs mehrerer Wellen. Siemens-Zeitschrift 1927, October, H. 10, S. 678.
11. Е. А. Сви́рский и П. К. Попов. Испытание машин постоянного тока, 1927 г., стр. 282.
12. W. A. Tolwinsky u. S. M. Hochberg. Asynchrone Betriebsweisen der Drehstrom-Induktionsmaschine bei doppelter Speisung von ein und demselben Netz. A.f.E. 1928, Bd. 20, № 5, S. 162.
13. С. М. Гохберг. Намагничивающий ток трехфазного индукционного двигателя с переменным вращающимся полем. "Изв. Ленингр. политехн. ин-та" 1928 г., т. XXXI, стр. 109.
14. Проф. К. А. Круг. Бесколлекторные асинхронные двигатели 1928 г., стр. 237.
15. С. Б. Елиашевич. Новый метод искусственной нагрузки трехфазного индукционного двигателя. "Изв. Бакинск. политехн. ин-та" 1928 г.
16. L. F. Holder. Principles of Selsyn Equipments and their Operation. G.E.R. 1930, v. 33, № 9, p. 500.
17. J. Kristen. Spannungsregelung in Sekundärnetzen mittels Drehtransformatoren. Gesamtbericht Zweite Weltkraftkonferenz 1930, Bd. XII, S. 283.
18. H. Lund. Asynchronmaschinen im Gleichlauf. "Forschung und Technik" (AEG) 1930, S. 274.
19. A. M. Barmdas. Eine Methode zur künstlichen Belastung von Inductionsmotoren. E. u. M. 1931, № 5.
20. Б. П. Аларов. Асинхронный двигатель двойного питания со вспомогательной обмоткой на статоре. "Вести. теоретической и экспериментальной электротехники" 1931 г., стр. 32.
21. G. Sartori. Copiatori di Movimenti a distanza (Teleindicatori). L'Elettrotecnica 1931, v. XVIII, № 13, p. 303.
22. В. Т. Касьянов. Электрическая машина двойного питания как общий случай машины переменного тока. "Электричество" 1931 г., № 21, вып. I, стр. 1189.
23. В. Т. Касьянов. Электрическая машина двойного питания как общий случай машины переменного тока. "Электричество" 1931 г., № 22, вып. II, стр. 1282.
24. A. G. Conrad u. R. G. Warner. An Induction Motor with Paralleled Rotor and Stator. Quaterly Transactions of the AIEE 1932, № 2, p. 418.
25. Е. М. Голдковский. Синхронизация в звуковом кино и телевидении. 1933 г.
26. Проф. В. А. Толвинский. Paralleling Rotor and Stator. Electrical Engineering 1933, March, Letters to the Editor, p. 205.
27. A. Sornelin. La jonction électrique "Siemens" et ses applications aux télécommandes. Revue Générale de L'Electricité 1933, 20 mai, XXXIII, № 20 p. 651.
28. A. Sornelin. La jonction électrique "Siemens" et ses applications aux télécommandes. Revue Générale de L'Electricité. 1933, 27 mai, XXXIII, № 21, p. 687.
29. H. W. Reding. Synchronized Drives Without Mechanical Connection. The El. J. 1933, July, v. 30, № 7, p. 277.

30. C. Midworth and G. F. Tagg. Some Electrical Methods of Remote Indication. JIEE 1933, July, v. 73, p. 33.
 31. C. Schiebeler. Die Elektrische Welle. AEG Mitteilungen 1933, H. 5.
 32. A. Sornein. Les télécommandes électriques et leur application au pointage continu. RGE 1934, 14 Avril, XXXV, № 15, p. 501.
 33. R. H. Wright. The Application of the Synchronous Tie to Modern Control Problems. Iron and Steel Engr., 1933 г., v. 10, p. 123—30, № 5.
 34. C. W. Drake. Synchronized Mechanical Motion Without Mechanical Connection. Maintenance Engg 1932, v. 90, p. 441—3.
 35. F. M. Roberts. Selsyn Control for Paper Machines. Paper Trade JI. 1932, v. 95, p. 18—20.
 36. R. H. Rogers. Safeguarding and Controlling Sequence Operations. El. World 1932, v. 99, p. 372—5.
 37. W. B. Snyder. Synchronizing Conveyors by Photocells and Selsyns. El. World 1932, v. 99, p. 327.
 38. L. W. Bailey. Selsyn Devices and their Applications. Combustion 1931, v. 3, p. 21—5, 39, 46.
 39. R. A. Corley. Versatility of Application of Selsyn Equipment. GER 1930, v. 33, p. 706—11.
 40. L. De Florez. Application of Selsyn Remote Control in the Oil Refining Industry. 1930, v. 33, p. 378—83.
 41. A. E. Bailey. Meter Readings and Signals Transmitted by Selsyn Motors. Power 1928, v. 68, p. 434—5.
 42. H. A. Witne. Synchronous Ties. GER 1933, № 3.
 43. L. M. Nowacki. Induction Motors as Selsyn Drives. El. Engineering 1933, Dec., p. 848—53.
 44. T. M. Linville. J. S. Woodward. Selsyne Instruments for Position Systems. El. Eng. 1934, June, p. 953—960.
 45. Рывкин. Электрооборудование разводного моста. „Вестн. Электропром.“ 1933 г. № 12.
 46. А. Г. Никифоров. Электрический вал. „Вестн. Электропром.“ 1934 г., № 2, стр. 12—17.
-