

7444 621.313.13
P51

400

ПРОФ.

С. А. РИНКЕВИЧ

Э

ЛЕКТРИЧЕСКОЕ

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
МЕХАНИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ**

Ч. II

Проф. С. А. РИНКЕВИЧ 621.313.13

~~621.313.13~~
~~РЗТ~~

РСИ
ДЕП

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

6 МАР 1933

(ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА)

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

МИНСКАЯ ОБЛАСТНАЯ
РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР



Индекс ЭЭ-40-5-2.

Принятые основные условные обозначения.

A — работа. (Не смешивать с A — ампер!).
 $A = \mu \cdot Q$ — „теплоотдача“ двигателя (теплоотдающая способность).
 a — число параллельных ветвей обмотки.

$\alpha = \frac{t_a + t_z}{t_z}$ — отношение времен неустановившегося режима (ускорения и замедления) ко времени полного цикла работы.

$\kappa = \frac{k}{v}$ — коэффициент потерь (Verlustf.ktor — отношение постоянных потерь к переменным).

α — температурный коэффициент расширения.

B — магнитная индукция.

b — ширина.

γ — проводимость безваттная.

c_0 — удельная теплоемкость.

$C = c_0 \cdot Q$ — „теплоемкость“ двигателя (теплоосприимчивая способность).

c — постоянная (const).

C — емкость.

C — кулон.

$\epsilon = \frac{f_r}{f_p}$ — частота вращения / частота пульсации

D — диаметр.

E — электродвижущая сила (для переменного тока — действующее значение

э.д. силы: $E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}}$).

$E_{\max}$ — амплитуда э.д. силы (для переменного тока).

e — мгновенное значение э.д. силы.

$\epsilon = \frac{t_a}{t_a + t_0}$ — коэффициент продолжительности работы; коэффициент включения — отношение времени работы двигателя (станка) к полному времени наблюдения.

$\epsilon_0 = (1 - \epsilon)$ коэффициент простоя $\frac{t_0}{t_a + t_0}$.

η — отдача, общее выражение коэффициента полезного действия.

η_B — коэффициент загрузки.

η_g — коэффициент одновременности

η_A — коэффициент использования мощности (для группового привода: $\eta_A = \eta_g \cdot \eta_{B \text{ mitt}}$; для одиночного привода: $\eta_A = \epsilon \cdot \eta_B$).

Φ — поток.

F — сила. (Но F — фарада.)

f — частота.

f_r — коэффициент трения 2-го рода (качения).

Φ — сдвиг фазы.

Φ — скачок скорости при переходе с одной ступени на другую.

GD^2 — маховой момент $\approx 40 J$ (D — диаметр инерции, J — момент инерции).

G — вес.

G — проводимость (ваттная).

g — ускорение силы тяжести ($9,81 \text{ m/sec}^2$)

γ — удельный вес.

H — высота, глубина.

H — магнитная сила, напряжение.

h — частота включений.

h — час.

θ, ϑ — температура, считаемая от 0° Цельсия.

I — сила тока (для переменного тока, действующее значение силы тока

равное $\frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$).

$I_{\max}$ — амплитуда силы тока (для переменного тока).

i — мгновенное значение силы тока.

J — момент инерции.

$j = \sqrt{-1}$ — мнимое число.

k — коэффициент.

K_w — число контактов реостата.

L — самоиндукция.

l — длина.

M — взаимноиндукция.

M — момент вращения (kgm).

M — момент вращения двигателя.

M_A — пусковой момент вращения.

$M_B = I \frac{dw}{dt}$ избыточный момент; доля момента вращения двигателя, идущая на ускорение.

M_s — момент статического сопротивления.

m — масса (не смешивать с m — метр).

μ — коэффициент теплоотдачи.

μ — коэффициент трения I-го рода (скольжения).
 μ — магнитная проницаемость.
 min — минута.
 N — число проводников обмотки.
 n — число оборотов в минуту.
 ω — угловая скорость; угловая частота.
 $\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt}$ — угловое ускорение.
 ω_b — угловое ускорение.
 $\dot{\omega}_k$ — угловое замедление.
 P — мощность.
 P_m — мощность на валу двигателя.
 P_{*} (или P_a) — ваттная или активная мощность.
 P_{bt} (или P_r) — безваттная или реактивная мощность.
 p — число пар полюсов.
 p_m — перегрузочная способность.
 Q — количество электричества.
 Q — объем (m^3).
 q — площадь сечения проводника (mm^2); площадь поверхности (m^2).
 $\mathcal{N} = \frac{n_{\text{max}}}{n_{\text{min}}}$ — предел регулирования.
 R — сопротивление (электрическое ваттное).
 r — радиус.
 ρ — удельное сопротивление.
 ρ_j — радиус инерции.
 S — путь.
 S — магнитное сопротивление.
 s — неравномерность нагрузки.
 σ — скольжение.
 $T = \frac{C}{A}$ — постоянная времени нагревания.
 T — абсолютная температура.

T — период
 t — температура, считаемая от температуры окружающей среды.
 t — время.
 u^* — передаточное число всякой механической передачи; также коэффициент трансформации трансформатора.
 V — напряжение (V — вольт).
 v — скорость.
 $\dot{v} = \frac{dv}{dt}$ — ускорение или замедление ($\dot{v}_b$ — ускорение; $\dot{v}_k$ — замедление).
 W — энергия; потери в двигателе: (W — ватт).
 ω — число витков, обмотки.
 X — безваттное, реактивное сопротивление.
 x — неизвестное искомое число; в данной книге имеет еще и частное значение
 $x = \frac{I_A}{I_{\text{ном}}}$ — отношение пускового тока к номинальному.
 Y — полная проводимость.
 $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$ — полное сопротивление.
 z — число включений в 1 час.

Индексы

max — максимальный
 min — минимальный
 mit (или med) — средний
 ном — номинальный или нормальный
 т. q. — средний квадратичный

b — значок, относящийся к процессу ускорения
 v — то же к замедлению
 s — то же к установившемуся состоянию.

* Под передаточным числом „ u “ условимся понимать отношение состояния на предыдущей ступени к состоянию на последующей, руководствуясь направлением энергетического потока: например, в трансформаторах — отношение первичного напряжения или тока ко вторичному; в электроприводах — отношение скорости вращения ведущего вала к скорости ведомого.

Для большинства станков передачи применяются в приводе с целью понижения скорости вращения двигателя, и, следовательно, величина „ U “ является числом, большим единицы. На этом же основании скачок скорости „ u “ в коробке скоростей (см. главу VIII) всюду был принят большим единицы.

ГЛАВА V.

ТИПЫ ДВИГАТЕЛЕЙ.

§ 1. Классификация типов.

Прежде чем говорить об общих основаниях для выбора двигателей по типу и делать попытку намечения общей руководящей в этом отношении линии проектирования, несомненно необходимой в видах стройности оборудования, а следовательно и простоты его эксплуатации, надо выяснить в самых общих чертах причины крайнего разнообразия имеющихсЯ в обращении типов двигателей.

Это разнообразие, которое надо учесть при электрификации фабрики или завода, а тем более при расширении существующего оборудования их, имеет как весьма существенные причины, базисные на условиях работы двигателей, так зачастую и чисто случайные, кроющиеся в совершенно несущественных особенностях расчета и конструирования конкурирующих фирм — вроде ничтожно отличающихся размеров конца вала, а главным образом размеров вспомогательных деталей: нормальных шкивов, шпонок, щеток, салазок и т. д.

Если даже не возлагать больших надежд на наблюдаемую теперь во всех странах тенденцию к возможному сокращению типов двигателей путем нормирования их, то необходимо совершенно сознательно проводить самую жесткую стандартизацию деталей, а при проектировании преследовать наибольшую цельность и простоту оборудования.

В целях выяснения поставленной задачи ниже дается классификация типов двигателей.

В основание ее можно было бы положить принцип „производственного назначения“ двигателя, так как при современных тенденциях специализации типов можно определенно говорить о типах: „металлургическом“, „ткацком“ и т. п. В стремлении возможно более полного удовлетворения производственных требований современное машиностроение считает рентабельным строить двигатели для узко-специального назначения.

Однако при такой классификации некоторые признаки неизбежно повторялись бы, а потому рациональнее провести ее по общим конструктивным признакам:

- а) По способу защиты двигателей от окружающей среды.
- б) По способу охлаждения внутренних пространств двигателей.
- в) По расположению вала и форме концов его — для непосредственного соединения или для шкива, зубчатки и т. д.
- г) По форме станины.
- д) По специальному выполнению — комплектно с передачей или даже со станком в целом.

е) По числу и типу подшипников.

ж) По числу оборотов.

Остановимся последовательно на каждом из них в отдельности и прежде всего на классификации типов по способу защиты от окружающей среды помощью:

I. Внешнего выполнения (корпуса).

II. Подбора соответствующей изоляции.

§ 2. Защита двигателей путем „закрытия“.

В отношении первого способа защиты русскими, *) американскими и немецкими нормами двигатели разделяются на:

1) Открытые электродвигатели, у которых доступность внутренних токоведущих и вращающихся частей совершенно не затруднена.

2) Защищенные электродвигатели (Geschützte Motoren), у которых обмотки и другие части, находящиеся под напряжением или в движении, защищены от случайных прикосновений или проникновения постороннего тела, но таким образом, что свободный обмен воздуха между двигателем и окружающей средой не нарушен. Против пыли, влажности и газов, содержащихся в воздухе, эти двигатели не защищены.

Защита от капель, дождя и брызг достигается устройством специальных жалюзи и щитов.

3) Закрытые двигатели (Gekapselte), или с закрытыми кольцами, не будучи абсолютно герметичны, не имеют никаких других отверстий, кроме отверстий для болтов, скрепляющих отдельные механические части, и для вывода проводов, или же имеют только отверстия, защищенные крышками, препятствующими проникновению воздуха из машины в окружающее пространство и обратно.

4) Закрытые вентилируемые двигатели (Geschlossene mit Luftaufschluss) — закрытые двигатели с независимым охлаждением. Охлаждающий воздух подводится посредством труб или других аналогичных приспособлений.

5) Закрытые с водяным охлаждением.

6) Закрытые с охлаждаемым кожухом (Geschlossene mit Mantelkühlung), в которых обмотки и другие части, находящиеся под напряжением или в движении, закрыты. Двигатель снабжен вторым кожухом. Охлаждение производится вентилятором на валу двигателя, прогоняющим засасываемый воздух между кожухами. Нормы СССР этого типа не предусматривают.

За последнее время начинает распространяться закрытый тип с обдуваемым кожухом (поверхностным охлаждением).

7) Двигатели с защитой против взрыва для установки во взрывчатой окружающей среде.

Эту последнюю категорию, в которой окружающая среда защищается от работы двигателя (искр), проф. Филиппи противопоставляет всем предыдущим, где внутренние части двигателя защищаются от окружающей среды.

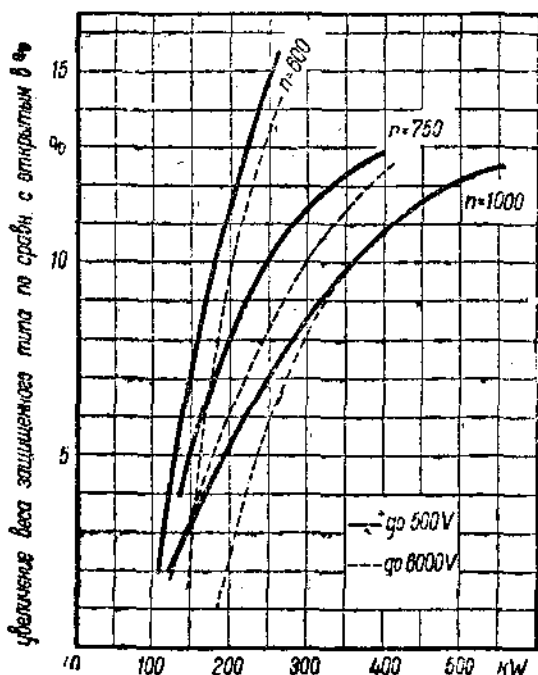
*) См. правила и нормы для испытания электрических машин, IX, БЭС.

Двигатели этого типа снабжены кожухом, который в состоянии противостоять взрывам газа внутри его и не передавать пламени взрывчатому газу, и наоборот.

Остановимся несколько на выяснении средств, коими достигается защита путем „закрытия“, на их достоинствах и недостатках, а также главных областях применения:

1) Совершенно открытые двигатели являются, конечно, наиболее легкими,—следовательно, наиболее дешевыми и наиболее удобными в отношении надзора и ухода, так как все части, нуждающиеся в надзоре, как коллектор, торцовые части обмотки, бандажи, междужелезное пространство, непосредственно доступны осмотру. Продувка не требует со стороны монтера никаких предварительных операций, вроде отвинчивания крышек, что при большом количестве двигателей чрезвычайно упрощает его работу. Поэтому отступления от применения этого типа могут быть оправдываемы лишь исключительными соображениями. Даже там, где требуется защита от окружающей среды, надо стремиться, где возможно, достигнуть ее подбором изоляции (см. II род защиты) и „запасом“ мощности, придерживаясь все же „нормального“ открытого типа. *)

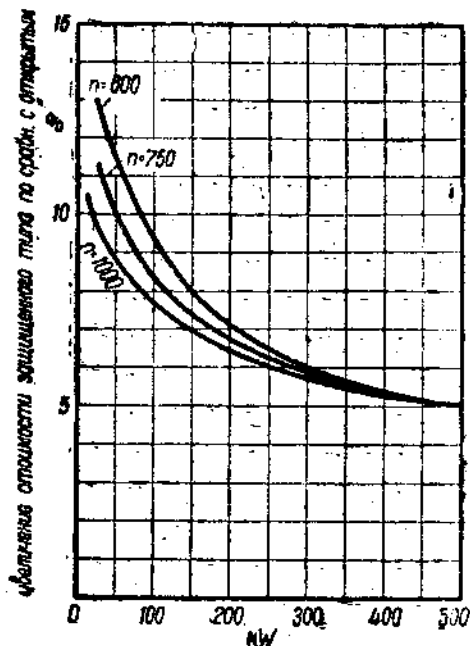
2) „Защищенные“ электродвигатели выполняются в настоящее время либо простым добавлением одной (четвертой) спицы в боковом щите, сверху, для предохранения от крупных предметов, либо устройством в щите овальных отверстий, которые для предупреждения попадания мелких предметов (стружек) или прикосновения по оплошности к токоведущим частям иногда затягиваются проволоочной сеткой с более или менее крупными отверстиями. Эти электродвигатели не отличаются от первого типа по весу и стоимости, но в отношении ухода сетка является нежелательной.



Фиг. 238.

*) Однако при очень малой скорости вращения даже совершенно открытый тип с естественной циркуляцией не дает достаточного охлаждения, и в мощных двигателях (например прокатных) специальной формой роторных спиц эффект естественной вентиляции усиливается током воздуха от центра через радиальные каналы в роторе и статоре к периферии.

Двигатели с защитой от дождя, капель и брызг отличаются от предыдущих некоторым стеснением доступа охлаждающего воздуха, которое вызывает увеличение нагрева двигателя и соответственное



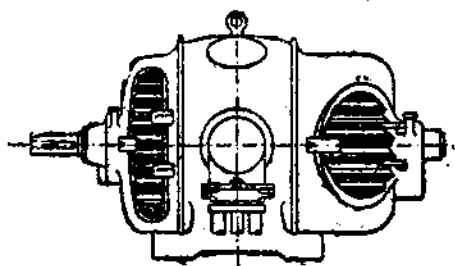
Фиг. 239.

уменьшение мощности, которое, по данным различных фирм, составляет около 5%. Следствием этого будет увеличение веса двигателя на единицу мощности. Последнее можно принять в среднем равным 10%, а увеличение стоимости от 5 до 15% в зависимости от выполнения (см. кривые на фиг. 238 и 239).

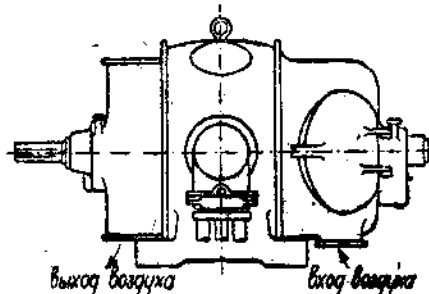
Для защиты от капающей воды является достаточным закрытие щитовых отверстий с помощью „жалюзи“ (фиг. 240); что касается предохранения от летящих по определенному направлению брызг, то закрытие щитовых отверстий может оказаться недостаточным; в этом случае крышка выполняется глухой, по крайней мере со стороны брызг, с особыми приливами для подвода воздуха снизу и с отводом воздуха либо через соответствующий прилив с дру-

гой стороны (фиг. 241), либо через жалюзи, либо, наконец, сверху, под особым прикрытием.

Как переходную форму защиты можно отметить установку такого двигателя на фундаменте, в котором помещается особый



Фиг. 240.

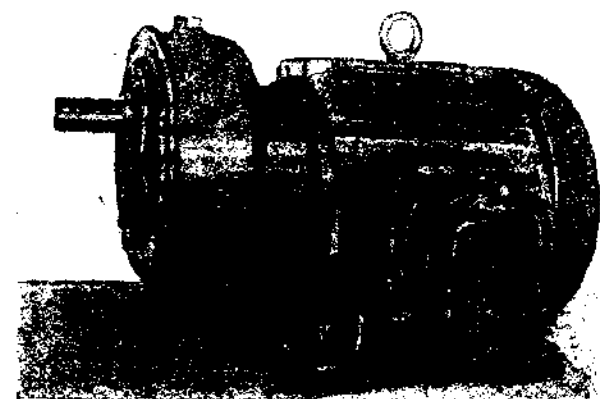


Фиг. 241.

фильтр из бумазеи. Иногда фильтр этот монтируется сверху над двигателем (последнее показано на фиг. 242). Однако цель, преследуемая таким устройством, а именно защита не только от брызг воды, но и от пыли в помещении, почти не достигается по

двум причинам: во-первых, при сильной загрязненности воздуха (прядаильные, цементные фабрики, мельницы и т. п.) такие фильтры быстро забиваются пылью, результатом чего бывали даже случаи перегрева и аварий двигателей, вполне понятных, если учесть недоступность фильтра непосредственному надзору; во-вторых, при остановке электродвигателя пыль несомненно попадает в выпускные окна. Поэтому применение двигателей этого типа должно быть ограничено случаями небольшого содержания пыли в воздухе, продолжительной без перерыва работы двигателя и трудной по месту установки продувки и очистки.

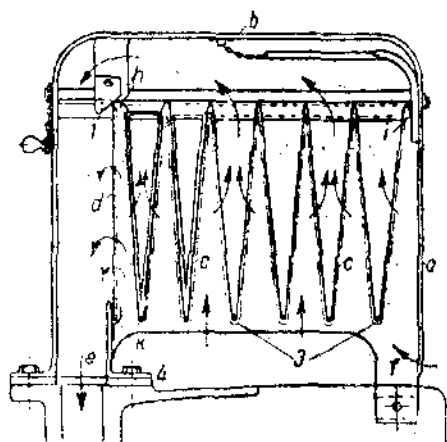
3) Закрытые электродвигатели. Если два предыдущих типа не удовлетворяют условию защиты от пыли, то тем более—от влажности, заключающейся в воздухе, или от едких газов. Здесь необходимо закрытие электродвигателя со всех сторон. Так как при этом охлаждение происходит только через наружную поверхность и якорь находится в особенно тяжелых условиях работы, то естественно, что такой двигатель оказывается на 100—140%



Фиг. 243.

ное закрытие быстро ставит предел конструктивно-рациональной мощности, а именно около 150 kW.

В целях улучшения теплоотдачи предложен целый ряд мер, как то: ребристая поверхность наружного кожуха, которую применяют завод Вестингауз, Сименс-Шуккерт, ВЭО для некоторых закрытых двигателей (фиг. 243), особый охладитель, пристраиваемый над мотором и увеличивающий его излучающую поверхность.



Фиг. 242.

тяжелее открытого и вдвое дороже его.

Из приводимых ниже кривых (фиг. 250) видно, что влияние такой ухудшенной теплоотдачи сказывается тем резче, чем больше электродвигатель (допускаемая длина равной диаметру, имеем мощность, пропорциональную кубу линейных размеров, а поверхность охлаждения—квадрату их), и таким образом пол-

Кроме описанного только что закрытого типа, в настоящее время русскими и иностранными нормами предусматривается герметически закрытый двигатель, т. е. такой, который был бы в состоянии работать под водой.

Нормально герметический двигатель должен выдерживать без вреда и без понижения изоляции (ниже 500 000 Ω) полное погружение в воду на 4 часа. Соотношение весов и стоимостей этих двигателей, примерно, такое же, как и для обыкновенных закрытых.

Надо иметь в виду, что достичь полной герметичности простым закрытием боковых отверстий в щитах, конечно, невозможно. Поэтому во время нагрева и охлаждения двигателей наблюдается неизбежное периодическое просачивание воздуха изнутри наружу и обратно. Таким образом влага воздуха неизбежно проникает

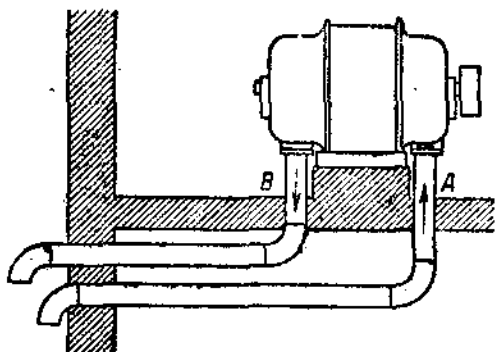
внутрь и конденсируется там при охлаждении двигателя в периоды длительных остановок.

Для того, чтобы избежать этого весьма нежелательного явления, предлагается, помимо усиления изоляции, поддерживать температуру двигателя в периоды остановки на определенном уровне путем пропускания через его обмотки тока от особого „сушильного“ трансформатора низкого напряжения (12—15 В). По данным ВКЭ,

расход энергии на сушку определяется около 1 kVA на 25 л. с. мощности двигателей. Однако такой подогрев при прерывистой нагрузке с периодическим охлаждением, помимо сложности, имел бы последствием значительное увеличение размеров двигателей, что будет понятно из теории нагревания, изложенной в следующей главе.

Надо заметить, что закрытый тип применяется иногда не только для защиты от окружающей среды, но (например в больницах) и в целях возможного устранения шума, производимого от вибрации воздуха, трения щеток и намагничивания при переменном токе. Конечно, здесь большую роль должна играть и особая тщательность в монтаже электродвигателя.

4) Закрытые вентилируемые двигатели. Мерой, позволяющей совершенно обойти ограничение мощности закрытых электродвигателей, является подвод чистого воздуха, забираемого извне помещения установки. Подвод этот может совершаться по трубам или каналам, но при этом обязательно должен быть оборудован и отвод нагретого воздуха за пределы помещения (фиг. 244). При длине труб от 10 до 20 м возможно большую часть обойти собственным вентилятором ротора двигателя.



Фиг. 244.

По данным Броун-Бовери (Preisliste, M. 7, и S. S. W., M. 7 а), для асинхронных двигателей до 250 kW количество необходимого воздуха подсчитывается по формуле

$$Q \text{ м}^3/\text{сек} = 6 \frac{100 - \eta}{\eta} \cdot \frac{P_m}{100},$$

где P_m — полезная мощность на валу двигателя. Скорость воздуха в трубах принимается 3—5 м/сек. Падение давления во всем трубопроводе 2—5 mm водяного столба (меньшие цифры для малых двигателей, большие — для больших до 250 kW).

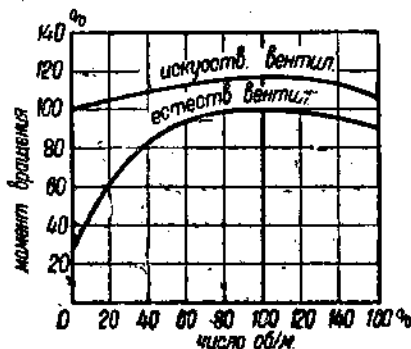
Таблица 26 дает примерные сечения подводящих каналов для вентилируемых двигателей постоянного и переменного тока.

ТАБЛИЦА 26.

Мощн. электродв. HP	2,5	3	8	12	17	23	22	35	46	55	70	100	130
Число об/мин. . . .	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1000	1000	1000	1000	1000	1000	900
Наименьшее сечение трубы, в см ² . .	70	100	160	200	230	250	300	350	400	450	550	650	750

Таблица составлена для металлических гладкостенных труб. Для каналов из каменной кладки цифры сечения необходимо повысить на 25%.

Искусственная вентиляция дает возможность избежать ограничения мощности закрытых двигателей. Наоборот, при интенсивном обдувании удается повысить мощность по сравнению с открытым двигателем с естественной вентиляцией. На фиг. 245 дается сравнение свойств широко регулируемого открытого двигателя с естественным охлаждением и того же двигателя после его „закрытия“ с подводом воздуха по специальному каналу. *) Кривые показывают момент вращения, который двигатель может развить в обоих случаях при продолжительной нагрузке.



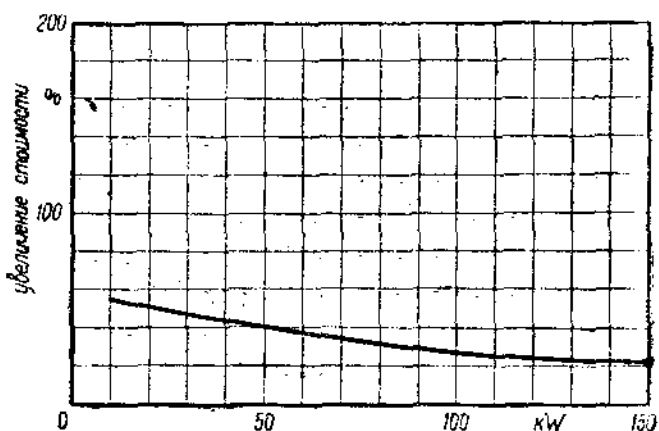
Фиг. 245.

На фиг. 246 дано увеличение стоимости этого типа двигателя с самостоятельным вентилятором на валу против нормального открытого двигателя.

Если расстояние от наружной стены до двигателя велико, то такая система железных трубопроводов, конечно, весьма удорожает установку, требует постороннего вентилятора (так как внутренней вентиляции недостаточно при большом сопротивлении труб) и воз-

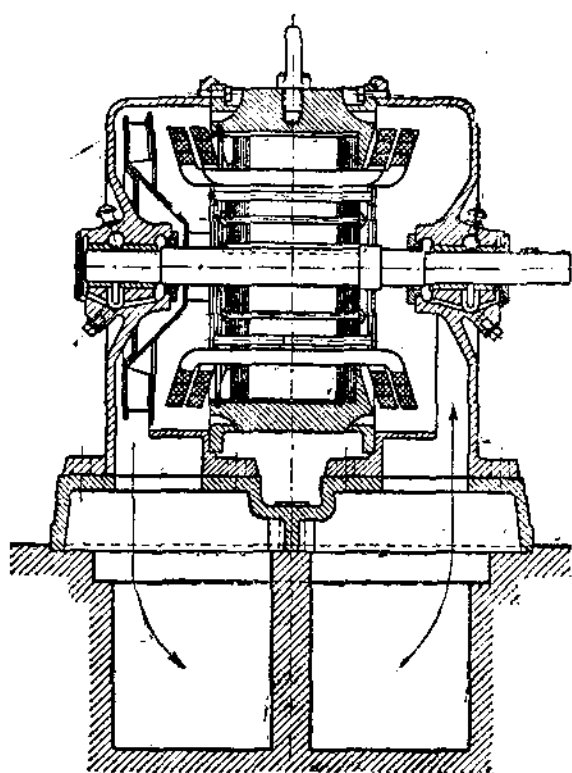
*) См. Stiel, Elektr. Papiermaschinenantriebe.

можно либо в случае единичных установок сравнительно крупных мощностей, либо при массовой установке двигателей, если они симме-



Фиг. 246.

трично расположены. Так, при электрификации прядильных кольцевых ватеров, которые в большом количестве и совершенно



Фиг. 247.

симметрично располагаются по этажам прядильных фабрик (отличающихся большой загрязненностью воздуха пылью и хлопковой мелочью), подвод и отвод чистого воздуха совершаются по двум или четырем каналам, проложенным вдоль всего помещения (фиг. 247). В тех же каналах обычно прокладываются и электрические кабели силовой сети. Как обязательное правило при этом, свежий воздух подводится в трубах или каналах под давлением, а не разрежением, во избежание присоса загрязненного воздуха через неплотности.

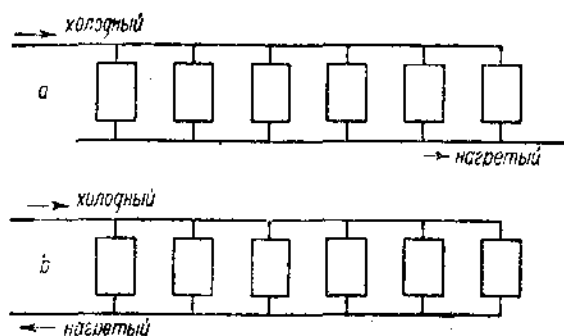
При групповой вентиляции необходимо, чтобы общий путь прохождения свежего и нагретого воздуха для всех двигателей был

один и тот же (фиг. 248, а), так как только в этом случае можно ожидать равномерного охлаждения всех двигателей. С этой точки зрения совершенно недопустима установка трубопроводов, изображенная на фиг. 248, б.

5) Полную аналогию с этими двигателями представляют закрытые двигатели с водяным охлаждением кожуха. (Сюда не относится водяное охлаждение подшипников, довольно частое для двигателей крупных мощностей.)

Тип этот имеет весьма ограниченное применение из-за накладных расходов на охлаждающую воду и громадного неудобства в эксплуатации в виду возможности разрыва охлаждающей рубашки и труб при замерзании воды. Тем не менее насосных установках, выполняемых комплектно (двигатель с центробежным насосом), особенно в специальной вертикальной конструкции их для откачки грунтовых вод при проходке шахт, водяное охлаждение применяется весьма часто; при этом вода, циркулирующая винтообразным путем в рубашке кожуха, возвращается из первой ступени давления насоса. Таким образом специального водопровода здесь не требуется.

Однако при благоприятных обстоятельствах, т. е. мягком климате и близости чистой холодной воды, возможно и массовое применение таких двигателей. Так, ВКЭ описывает пример установки таких двигателей на одной текстильной фабрике, где водяное охлаждение кол-



Фиг. 248.

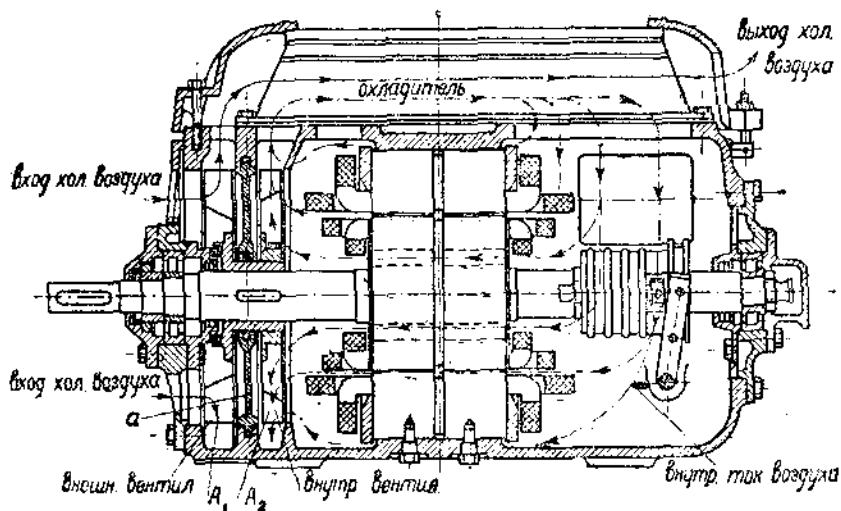
лекторных двигателей переменного тока было так интенсивно, что служило источником охлаждения помещения в летнюю пору.

Несомненно, система с независимым охлаждением может быть применена лишь при условии ограниченной длины трубопроводов, приходящейся на один двигатель, и затруднительна особенно при водяном охлаждении для сотен метров, например для подземных шахтных установок, где закрытые двигатели являются абсолютно необходимыми.

6) В таких случаях с успехом может быть применен особый тип закрытых двигателей с охлаждаемым кожухом (Kühlmanteltype, фиг. 249).

Из чертежа виден принцип их устройства: кожух обычного, совершенно закрытого двигателя концентрически охватывается частично или почти полностью наружным кожухом. На валу сидят два вентиляторных колеса A_1 и A_2 . Первое из них прогоняет непрерывную струю холодного окружающего воздуха (влажного или загрязненного) в пространстве между наружной оболочкой и кожухом; большая скорость его обеспечивает невозможность забивки пылью этого узкого пространства и, следовательно, хороший тепло-

обмен. Задачей второго вентилятора A_2 является помощью непрерывной циркуляции воздуха, заполняющего внутренность двигателя, содействовать быстрой передаче тепла от наиболее горячих внутренних частей (якоря) статору, от которого тепло удаляется наружным потоком вентилятора A_1 . Чтобы увеличить поверхность соприкосновения, предложен дополнительный охладитель, помещаемый сверху или у основания двигателя, где в узких параллельных кана-



Фиг. 249.

лах достигается встречный или параллельный ток теплого внутреннего и наружного холодного воздуха.

Результаты, достигнутые такой конструкцией, непосредственно видны из кривых, представленных на чертежах (фиг. 250), где по оси абсцисс отложены мощности двигателей в киловаттах, а по оси ординат — их веса.

Кривые фиг. 250 составлены для двигателей трехфазного тока на 1000 об/мин и на напряжение до 500 W. Разница в стоимости двигателя с охлаждаемым кожухом и открытого приведена на фиг. 251.

Надо заметить, что у двигателей с искусственной вентиляцией известная часть энергии затрачивается на нее и соответственно уменьшается полезная мощность. Это особенно относится к двигателям с охлаждаемым кожухом и двумя вентиляторами. В настоящее время они производятся до 500 kW, но по соображениям спроса, а не конструктивным, тогда как для закрытых двигателей предел в 150 kW ставится именно последними.

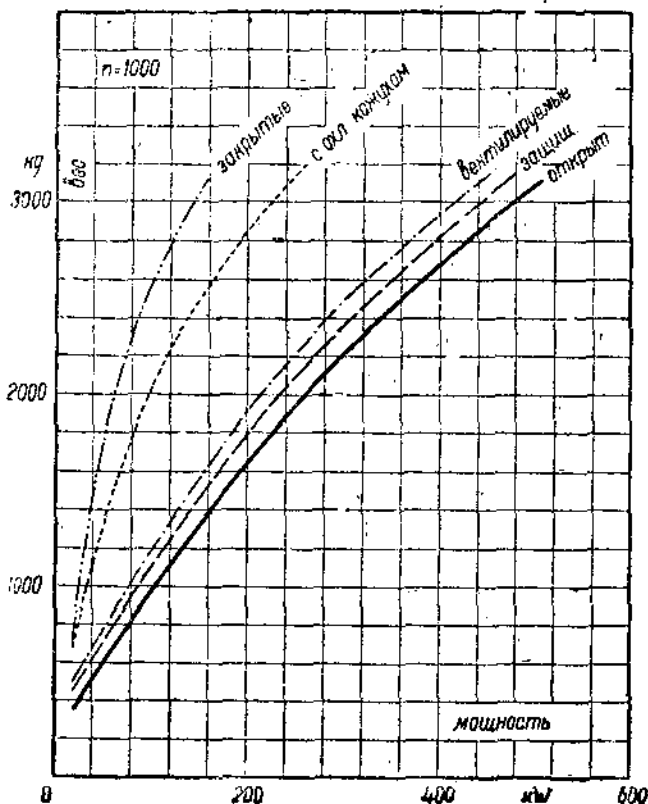
7) Двигатели, безопасные для установки во взрывчатой среде (Schlagwettersichere). На основании опытов, произведенных в специально устроенном штреке в Дортмунде близ Гельзенкирхена со взрывчатым рудничным газом, ныне установлены вполне надежные и совершенные принципы конструирования „безопасных“ двигателей:

а) либо совершенно закрытых, с корпусом, рассчитанным на внутреннее давление не менее 8 атм. (в случае взрыва внутри);

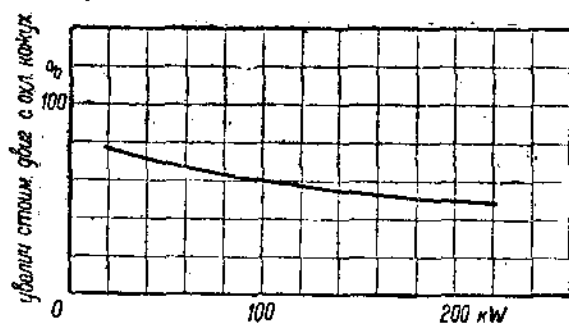
б) либо — с вентиляцией, причем вентиляционные отверстия должны быть защищены особым пластинчатым предохранителем (фиг. 252). Эта пластинчатая защита состоит из ряда медных колец, наложенных друг на друга с промежутками в 0,5 мм и притягиваемых к кожуху болтами боковых щитов.

Если внутри двигателя произойдет взрыв рудничных газов, то он не передается окружающей среде, так как температура газов, вырывающихся через узкие щели, будет достаточно понижена благодаря теплопроводности медных колец. Однако охлаждение двигателей такой системы сильно затруднено. Особенно неудобно их применение в весьма пыльных помещениях, где пыль быстро забивает узкие вентиляционные щели. Кроме того, так как и при пластинчатой защите остается в силе требование солидного выполнения частей, то в результате оба типа почти не отличаются весом и ценой.

(Надо заметить, что в виду особо тяжелой работы таких двигателей в горных установках обычно вводятся добавочные условия „повышенной безопасности“ в виде понижения допустимого на-



Фиг. 250.



Фиг. 251.

грева на 25% от нормального и такого же увеличения междуду-
лезного пространства.)

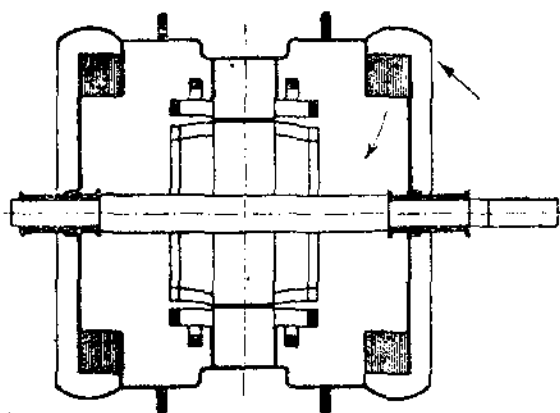
Наконец, в установках трехфазного тока, почти исключительно
применяемого в горном деле, и тем более при взрывчатых газах,
описанная в п. 7 защита применяется не для всего двигателя,

а лишь для колец, по-
крываемых специаль-
ным кожухом; сам дви-
гатель выполняется со-
вершенно открытого
типа с соответствую-
щей изоляцией. На чер-
теже (фиг. 253) пред-
ставлен такой электро-
двигатель фирмы Си-
менс-Шуккерт.

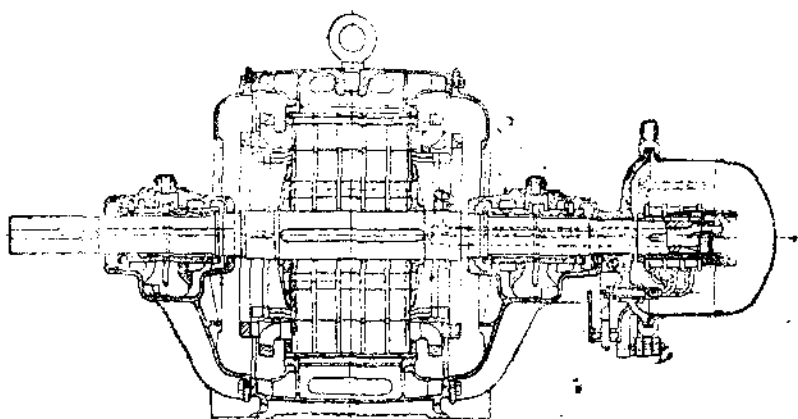
Подобные двигате-
ли в большом ко-
личестве устанавлива-
ются в шахтах и на
нефтяных промыслах.

Сравнительное су-
ждение о весе и стои-

мости различных типов двигателей можно иметь из следующей
таблицы 27, составленной на основании каталогов иностранных



Фиг. 252.



Фиг. 253.

заводов, причем открытый тип принят за единицу сравнения.

ТАБЛИЦА 27.

Т и п	Вес	Цена
Открытый	1	1
Закрытый с вентилятором . .	1,15	1,2
Совершенно закрытый	2,1	2,0

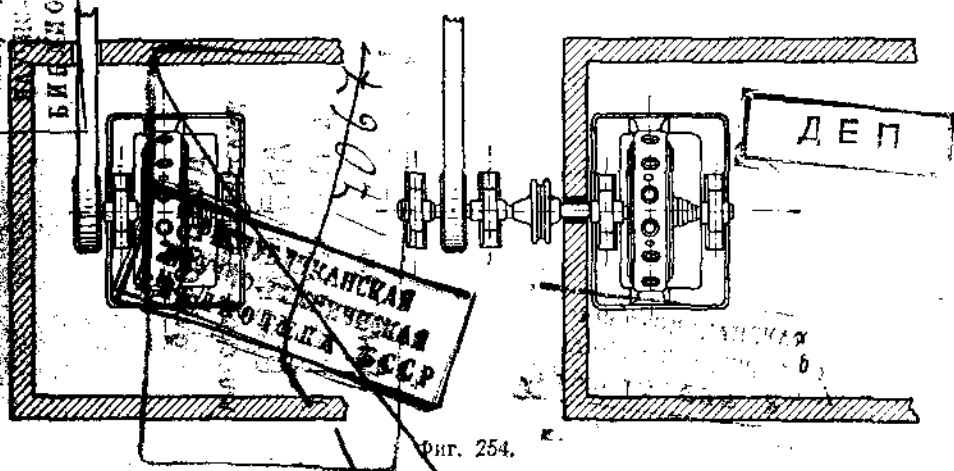
Из всего вышесказанно-
го ясно, что всякое „за-
крытие“ двигателя влечет
за собой, во-первых, за-
труднение ухода и, во-вто-
рых, большее или меньшее
увеличение размеров на еди-
ницу мощности, которое бы-

стро ставит предел изготавливаемым мощностям, особенно для совершенно закрытых двигателей.

Средством защиты двигателя, свободным от этих недостатков, является:

1) либо вынесение самого двигателя за пределы помещения, связанное, однако, с удлинением вала или передач; так, например, в красильных отделениях, где сильная влага связана с химическим воздействием, в пороховых заводах и т. д. двигатель обычно выносится за наружную стену и сверху прикрывается навесом для защиты от атмосферных осадков;

2) либо оставление двигателя в том же помещении (прокатные станы, крупные групповые приводы текстильных фабрик и т. д.), но изолирование его особой будкой. То, что делается в этом направлении практически, часто поражает своей нецелесообразностью; так, зачастую в цементных, деревообделочных и прочих пыльных помещениях двигатель попросту закрывается деревянным ящиком, опрокинутым на него. Такой способ, не давая герметичности закрытого двигателя, в полной мере обладает обоими его недостатками, т. е. плохим теплоотводом и отсутствием надзора. Но даже и в подобной будке редко можно видеть обдуманность, тем более расчет. Действительно, если необходимо изолировать двигатель, работающий на ременном приводе, то пропускать ремень через отверстия, сделанные в стенке, как указано на чертеже (фиг. 254, а), конечно, совершенно нерационально, ибо такой ремень приносит с собой всю пыль соседнего помещения. Мало помогают и щеточки, кото-



Фиг. 254.

рые пристраивают иногда над и под проходящим ремнем, тем более что такая „электризация“ ремня в некоторых условиях при взрывчатой пыли может быть даже опасной. Можно рекомендовать установку согласно (фиг. 254, б), правда, за счет лишнего подшипника и муфты, но зато с пыленепроницаемым сальником, который очень легко осуществить в стенке. Размеры такой будки обязательно должны быть рассчитаны на удаление тепла, обусловливаемого потерями в двигателе, с устройством по большей части искусственной вентиляции. Количество воздуха, следовательно размеры

будки, а также и мощность необходимого вентилятора определяются из величины потерь в двигателе. Последние могут быть получены для любой нагрузки по кривой к. п. д. двигателя:

$$W = P_m \frac{(1-\eta)}{\eta} \text{ kW.} \quad (263)$$

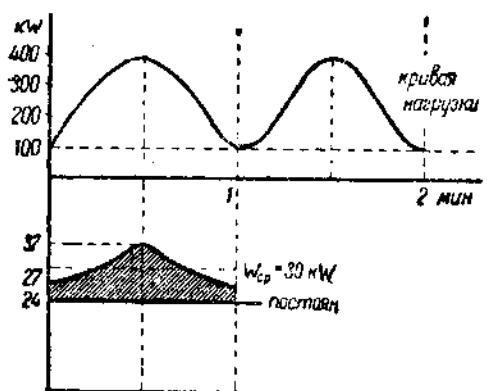
Если характеристика к. п. д. неизвестна, то потери можно определить по эмпирической формуле (см. следующую главу):

$$W = k + \frac{k}{\alpha} x^2, \quad (263')$$

где x — величина нагрузки в долях от полной, k — постоянные потери, $\frac{k}{\alpha}$ — переменные потери, причем коэффициент α колеблется в пределах 0,5 — 2,0.

При полной нагрузке $x = 1$, $W = k + \frac{k}{\alpha}$.

Пример. Мощность электродвигателя $P = 600 \text{ kW}$, $\eta = 92\%$, $\alpha = 1$.



Фиг. 255.

$$\begin{aligned} P \frac{(1-\eta)}{\eta} &= k + \frac{k}{\alpha}, \\ \text{откуда} \quad k &= \frac{P\alpha(1-\eta)}{\eta(\alpha+1)} = \\ &= \frac{600(1-0,92)}{0,92 \cdot 2} = 26 \text{ kW.} \end{aligned}$$

Для полной нагрузки, т. е. при $x = 1$,

$$W = 26 + \frac{26}{1} \cdot 1^2 = 52 \text{ kW.}$$

Соответствующее количество тепла будет:

$$Q = 52 \cdot 862 = 45000 \text{ cal/h.}$$

Пусть диаграмма нагрузки представлена приближительной кривой на фиг. 255; тогда кривая потерь, подсчитанная по формуле $W = k + \frac{k}{\alpha} x^2$ для различных степеней нагрузок (таблица 28) изобразится приближительной кривой в нижней части чертежа.

Путем планиметрирования средние потери можно с достаточной точностью принять равными 30 kW.

Тогда количество выделяемого тепла будет

$$30 \cdot 862 = 25860 \text{ cal/h.}$$

ТАБЛИЦА 28.

№	Нагрузка kW	Степень загрузки x	Потери $W = k + \frac{k}{\alpha} x^2 \text{ kW}$
1	400	0,665	37,5
2	300	0,50	32,5
3	200	0,33	28,6
4	100	0,165	26,7

Это тепло необходимо отвести. Пусть τ_a — температура входящего воздуха, τ_b — температура воздуха, покидающего помещение. Теплоемкость воздуха с прием равной 0,307.

Тогда необходимое количество воздуха:

$$L = \frac{Q \cdot (1 + \gamma \cdot \tau_b)}{0,307(\tau_b - \tau_a)} \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (264)$$

Можно также определить L помощью таблицы 29, дающей количество куб. метров воздуха, подлежащего отводу для удаления 100 cal/h при различных температурах.

ТАБЛИЦА 29.

Количество подлежащего отводу воздуха в кубометрах в час для удаления 100 калорий

Температура входящего воздуха, °C	Температура отводимого воздуха τ_b в °C																		
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
15	116	87	70	59	50	44	40	36	33	30	28	26	24	23	21	20	19	16	
16	174	117	88	70	59	51	44	40	36	33	30	28	26	24	23	22	20	19	
17	348	175	117	80	71	59	51	45	40	36	33	30	28	26	24	23	22	20	
18	—	350	175	117	88	71	59	51	45	40	36	33	30	28	26	24	23	22	
19	—	—	351	176	117	89	71	59	51	45	40	36	33	30	28	26	25	23	
20	—	—	—	352	177	118	89	71	60	51	45	40	36	33	30	28	26	25	

Если взять $\tau_a = 18^\circ$ и $\tau_b = 30^\circ$, то искомое количество воздуха будет 30 м³ и при выделении 25 860 cal/h полный объем будет:

$$L = \frac{25860 \cdot 30}{100} = 7758 \text{ м}^3/\text{ч} = 130 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Сечение отводящего канала, принимая скорость воздуха $v = 6$ м/сек, имеем:

$$\frac{130}{60 \cdot 6} = 0,36 \text{ м}^2.$$

При подсчете вентилятора и трубопровода учитываем потери в мн водяного столба по формуле:

$$h = 1,293 \sum \frac{v(1 + R + \Sigma \xi)}{2g(1 + \gamma)}, \quad (265)$$

где R — сопротивление от трения воздуха о стенки канала, ξ — местные сопротивления.

Для круглого и прямоугольного сечения канала:

$$R = \frac{\rho \cdot l \cdot u}{s},$$

где ρ — коэффициент трения (см. Ритшель, Отопление и вентиляция), l — длина канала в метрах, u — периметр канала в метрах, s — сечение канала в кв. метрах.

ТАБЛИЦА 30.

	ϵ
Впускные отверстия . . .	1,0—1,5
Прямоугольное острое колено	1,5
Прямоугольный отвод	1,0
Колено под углом 135°	0,6
Решетка в зависимости от свободного отверстия	1,0—2,0
Задвижка	0
Изменение сечения	1—1/2

Местные сопротивления даны в таблице 30.

§ 3. Защита двигателей „изоляцией“.

Перейдем теперь ко второму способу защиты — путем подбора изоляции (§ 1, в конце).

Определенной классификации электродвигателей в этом отношении русская терминология не имеет, но во всяком случае при выборе изоляции необходимо иметь в виду, от каких влияний среды она должна защищать, а именно:

1) от влажности применяется противосырная изоляция, т. е. пропитывание в масле, и при особо сильной влажности — асфальтирование;

2) от химического воздействия едких газов — кислотоупорная, преимущественно эмалирование;

3) от температурных воздействий — огнеупорная изоляция из минеральных веществ, саюды и азбеста;

4) от пробивания, при двигателях высокого напряжения, — усиленная изоляция.

Опытами установлено, что для защиты обмоток статора трехфазного мотора от возможных перенапряжений в сети надо особенно тщательно изолировать катушки, ближайшие к концам обмотки. Для того чтобы предупредить возможность попадания внутрь отдельных катушек обмотки высокого напряжения воздуха, от озонирования которого разрушается изоляция, в настоящее время катушки, пропитанные предварительно компаундной или асфальтовой массой, спрессовываются особыми машинами в миканитовой гильзе. Заложенные в пазы, они затем закрепляются там особыми распорными упругими клиньями.

По данным каталогов, усиленная изоляция повышает стоимость двигателя на 2—3%, а специальная изоляция — на 5—15%.

Для наглядности данные предыдущих двух параграфов сведены в таблице 31.

ТАБЛИЦА 31.

1	Сухое, не пыльное помещение.	Открытый электродвигатель.
2	То же, но есть опасность попадания посторонних предметов в виде осколков, стружек и т. д.	Открытый электродвигатель, защищенный решеткой на штифтовых отверстиях.
3	То же, но есть опасность попадания брызг.	Полузакрытый электродвигатель с вентиляцией.

4	Легкая пыль в сухом воздухе.	Полузакрытый с фильтром и жалюзи.
5	Сильная пыль.	Закрытый электродвигатель, с подводом воздуха по трубам (под давлением) и отводом по трубам.
6	Сильная пыль или влажный воздух.	Закрытый электродвигатель, либо с подводом по трубам, либо с водяным охлаждением, либо с охлаждением кожуха, либо с искусственным охлаждением, либо вынос электродвигателя в соседнее помещение.
7	Химическое воздействие.	Как и в предыдущем случае, но с кислотоупорной изоляцией, либо вынос вне помещения.
8	Установка на открытом воздухе.	Закрытый электродвигатель, с крышей для защиты от осадков.
9	Высокая температура.	Огнеупорная изоляция (минеральная).
10	Взрывчатые газы.	Применение пластинчатой защиты, или особо плотное капсулирование электродвигателя или колес (корпус на 8 атм.).

§ 4. Способы вентиляции двигателей.

Вторым признаком (б) классификации является способ вентиляции внутренних пространств двигателей.

Выполнение вентиляции достигло за последнее десятилетие весьма большого разнообразия. Это будет понятно, если учесть, что электротехника в усовершенствовании строения машин почти достигла предела в смысле качества материалов; в отношении же конструирования большое внимание уделяется улучшению вентиляции. Это выражается не только в устройстве вентиляторов на вращающихся частях даже малых двигателей, но и в самой укладке обмоток с расчетом на содействие обмену воздуха.

Особое внимание посвящено вентилированию закрытых двигателей, что уже можно было видеть при перечислении типов их. В отношении способа, которым достигается подвод охлаждающего воздуха, можно дать следующую классификацию:

1) естественное охлаждение — когда воздух прогоняется вращающимися частями двигателя без помощи вентиляторного колеса;

2) самовентилирование — с помощью вентилятора, сидящего на роторе или, во всяком случае, приводимого от вала двигателя и обслуживающего только его;

3) независимое (постороннее) вентилирование — когда воздух подается отдельным вентилятором, часто общим для целого ряда двигателей, с независимым приводом.

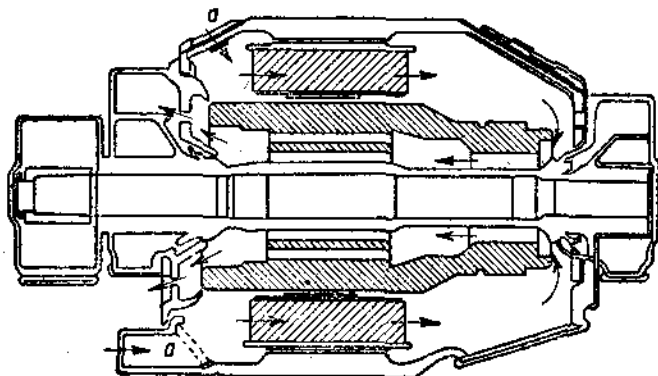
По роду охладителя можно делить охлаждение на три категории: воздушное, водяное охлаждение и замкнутая циркуляция газа.

Относительно направления воздушного потока можно различать: 1) однократный подвод воздуха и 2) двукратный подвод воздуха.

1) При однократном подводе воздух течет: а) либо вдоль поверхности якоря между магнитными полюсами, либо б) через каналы

внутри якоря и коллектора; последнее целесообразнее, так как вследствие тесноты каналов получается быстрый ток воздуха; кроме того внутренние части якоря являются самыми нагретыми.

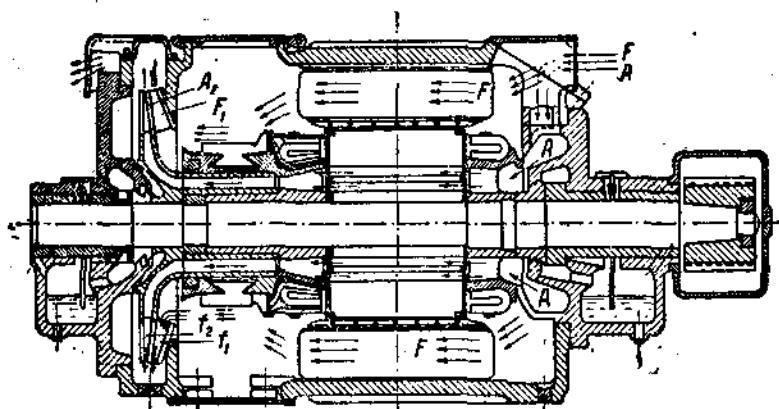
2) Чтобы совместить внутреннее охлаждение с охлаждением магнитных шпиль, необходим двойной подвод воздуха. При этом



Фиг. 256.

воздух течет самостоятельными потоками, которые могут быть направлены: а) последовательно или б) параллельно.

Схему последовательного потока, применяемого в Америке, можно видеть на чертеже (фиг. 256). Внутри якоря воздух попадает, уже нагретый охлаждением магнитных шпиль. Кроме того вслед-



Фиг. 257.

ствие соседнего расположения выходного отверстия происходит частичное засасывание горячего воздуха.

Этот тип воздухооборота применяется, главным образом, в совершенно закрытых двигателях в целях уравнивания температур внутренних и наружных частей.

Существенно выгоднее параллельный подвод воздуха, при котором необходимо двойное вентиляторное колесо (фиг. 257). Внут-

ренное колесо f_1 просасывает струю воздуха между индукторными шпупами и по поверхности якоря, а наружное f_2 — через внутренние каналы в якорь и коллекторе. Воздух вступает с одной стороны и нагретым выходит с другой. Иногда применяется комбинация двух способов, однако она сложна в выполнении.

Для сравнения различных способов приводим таблицу 32 сравнительного повышения продолжительной мощности в процентах от продолжительной мощности неохлаждаемого закрытого электродвигателя.

ТАБЛИЦА 32.

Однократный подвод воздуха		Двукратный подвод воздуха	
	Повышение продолжительной мощности P_D в %		Повышение продолжительной мощности P_D в %
а) При охлаждении поверхности якоря и магнитных шпупов	На 20—30	1. Последовательное охлаждение	На 60—80
б) При внутреннем охлаждении якоря и коллектора	—	2. Параллельное охлаждение	„ 80—120
		3. Комбинированное охлаждение	„ 80—120

Большое внимание обращается и на самое устройство и расположение вентиляторного колеса. Крылья колеса должны иметь радиальное устройство, т. е. без перемены действия при изменении направления вращения. В смысле предупреждения отложения пыли внутри двигателя засасывающее действие вентилятора предпочтительнее нагнетающего; таким образом вентилятор должен быть расположен на стороне выхода воздуха, а не входа, — иначе скорость прохождения последнего будет падать (это не относится к независимой вентиляции по трубам). В тех же целях впускные окна делаются большими, а внутренние каналы малыми, чтобы скорость входа воздуха была меньше скорости его внутри двигателя. Во избежание засасывания горячей угольной пыли от щеток, трущихся по коллектору, выходные окна и вентилятор чаще располагаются на стороне коллектора.

Эти общие замечания относительно конструктивного выполнения защиты и охлаждения электродвигателей, которыми вполне можно здесь ограничиться, имеют главной целью отметить источник разнообразия типов двигателей.

Правильное охлаждение двигателя приобретает все увеличивающееся значение, и вентилируемые двигатели начинают вытеснять закрытые даже в установке, наиболее неблагоприятной, как, например, под вагонами городских железных дорог. По исследованиям, произведенным на Канзасских электрических железных дорогах („El. Raylway Journal“, 1915, стр. 109) замена закрытых электродвигателей вентилируемыми дала:

- 1) значительную экономию в весе электродвигателей,
- 2) при одинаковой продолжительной мощности—экономия в цене на 25%,
- 3) при одинаковой часовой мощности повышение продолжительной мощности на 45—50%.

Итак, здесь опять мы видим влияние типа двигателей на соотношение продолжительной и кратковременной мощности (см. главу VI). Если принять за основание для сравнения продолжительную мощность открытого двигателя (100%), то защищенный двигатель тех же размеров дает 80%, а совершенно закрытый — только 30—40%.

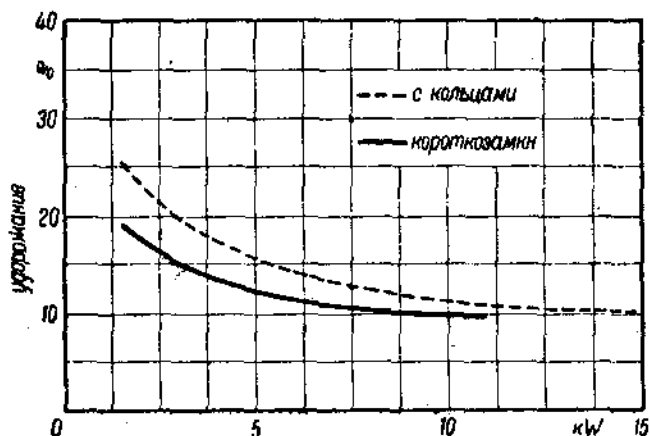
При сравнении часовых мощностей P_h разница между открытым и закрытым двигателем не превышает 20—30%; наконец, при весьма кратковременной работе закрытие открытого двигателя вообще не вызвало бы сколько-нибудь заметного увеличения размера, веса и стоимости двигателя.

К этому весьма важному и мало освещенному вопросу о соотношении мощностей в связи с выбранным типом вернемся в следующей главе, после изложения теории нагрева двигателей, тем более что на него влияет и тип двигателя по числу оборотов. Отношение $\frac{P_h}{P_D}$ будет большим у тихоходных двигателей.

§ 5. Расположение вала.

Следующий признак (в) классификации — расположение вала — дает два типа конструктивного выполнения: тип горизонтальных и тип вертикальных двигателей.

Первый тип—преобладающий и нормальный.



Фиг. 258.

Вертикальный тип применяется несравненно реже, преимущественно для непосредственного соединения, например в центрофугах, в кипоразрыхлителях, вертикальных центробежных насосах (при проходе шахт), в сверлильных и фрезерных машинах.

На фиг. 258 приведена кривая сравнения стоимости вертикальных двигателей с нормальными горизонтальными.

Увеличение веса вертикальных двигателей составляет около 10%. Кроме двух указанных основных положений вала, последний выполняется различно — в зависимости от рода соединения.

По роду соединения можно различать двигатели:

а) для непосредственного соединения, где свободный конец вала имеет длину, соответствующую муфте, с бороздкой определенных размеров для шпонки;

б) для шкива — удлиненный конец вала;

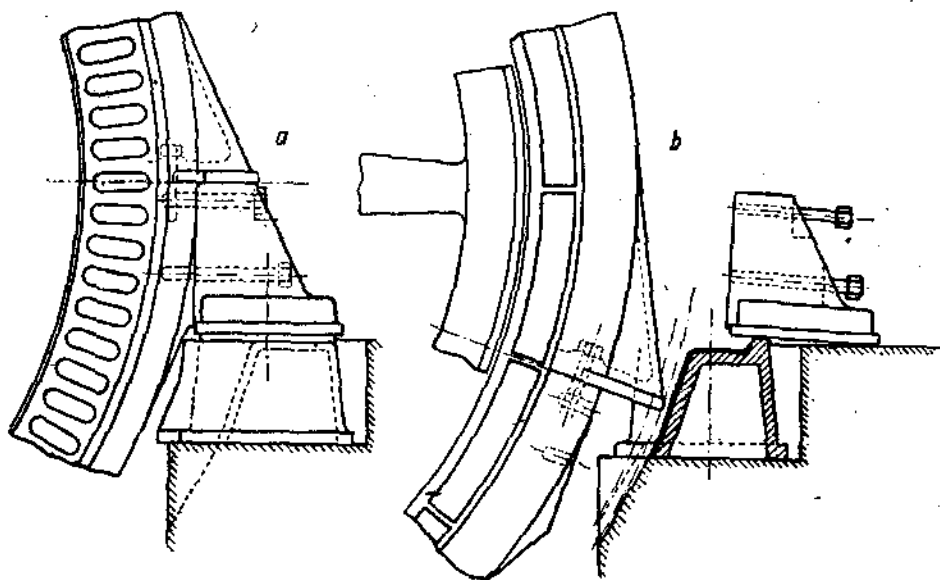
с) для зубчатого соединения, где часто конец вала выполняется на конус с шайбой и гайкой на торце;

д) по особому заказу вал выполняется с двумя свободными концами;

е) наконец, вал иногда оканчивается фланцем для жесткого соединения.

§ 6. Форма станины двигателей.

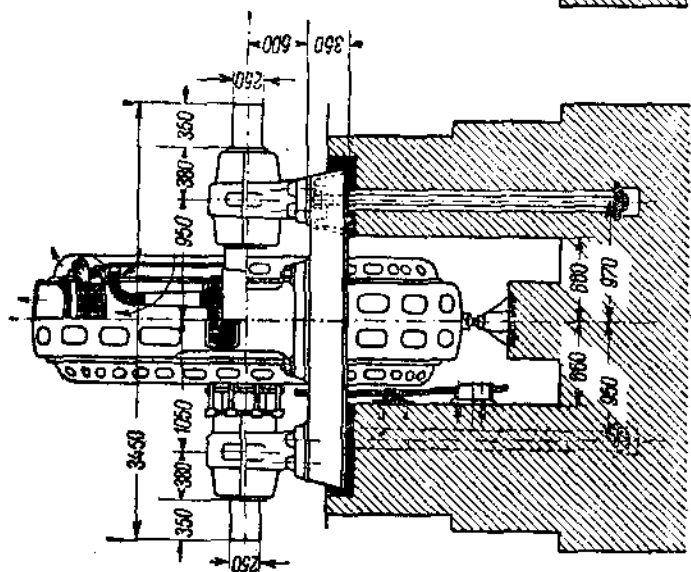
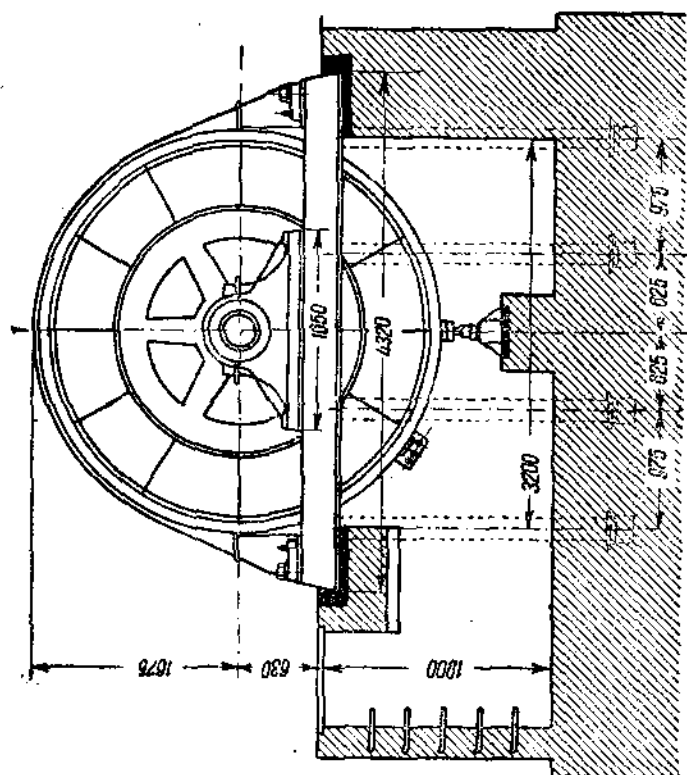
Дальнейшее различие выполнения двигателей (поз. „г“) по форме станины (и даже фундаментной плиты) прежде всего обуславливается мощностью двигателей P_m и числом оборотов n , т. е. величиной вращающего момента $M \equiv \frac{P_m}{n}$. В то время как для малых и тихоходных двигателей нормальной формой является цельноот-



Фиг. 259.

литая круглая станина, для мощных и особенно тихоходных двигателей она выполняется преимущественно разъемной на две и более части. Опорные лапы делаются разъемными на болтах, как показано на фиг. 259, а и б, что весьма облегчает монтаж, а главное — ремонт, так как возможен поворот статора на валу ротора, если заклинить предварительно междужелезное пространство.

Конструкция съемных опорных лап дает возможность путем поворачивания статора производить ремонт любой поврежденной



секция его на нижней половине с любого места. Кроме того эта конструкция допускает значительно меньшие размеры ямы (фиг. 260),

уширяя ее лишь с одной стороны (на чертеже—левой) и тем укорачивая размеры фундаментной плиты. По данным АЕГ такое устройство имеют все тихоходные двигатели (порядка 100 об/мин), начиная от 92 kW. По тому же источнику нормальная форма станины заменяется, начиная с мощностей в 220 kW при 250 об/мин и 500 kW при 300 об/мин, утопленной формой (niedrige Bauhöhe); последняя показана на фиг. 260, изображающей прокатный мотор трехфазного тока 1500 kW—нормально и 3000 kW—максимально, 215 об/мин.

Наконец, начиная примерно с мощности в 440 kW при 94 об/мин, и ротор нормально выполняется разъемным.

Сименс-Шуккерт дает нормально разъемную станину, начиная с мощностей и скоростей, указанных в табл. 33.

ТАБЛИЦА 33.

Мощность kW	1 250	630	440	370	220	175	147	103	75
Число об/мин <i>n</i>	369	295	245	209	184	161	146	120	103

Разъемные лапы—начиная с мощностей и оборотов, приведенных в табл. 34.

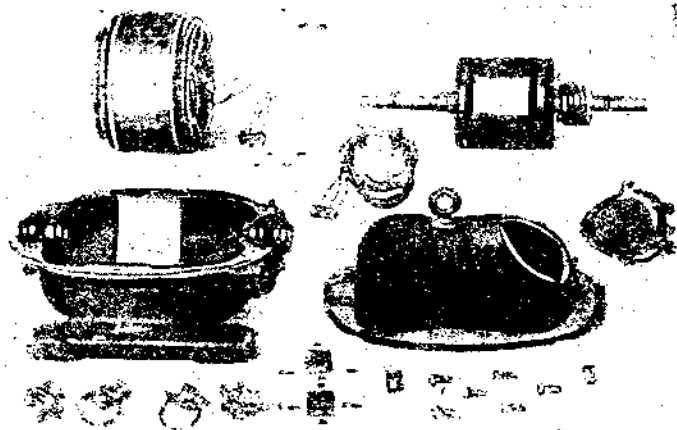
Разъемный ротор—начиная с мощностей, приведенных в табл. 35.

ТАБЛИЦА 34.

Мощность kW	960	775	550
Число об/мин <i>n</i>	147	122	104,5

ТАБЛИЦА 35.

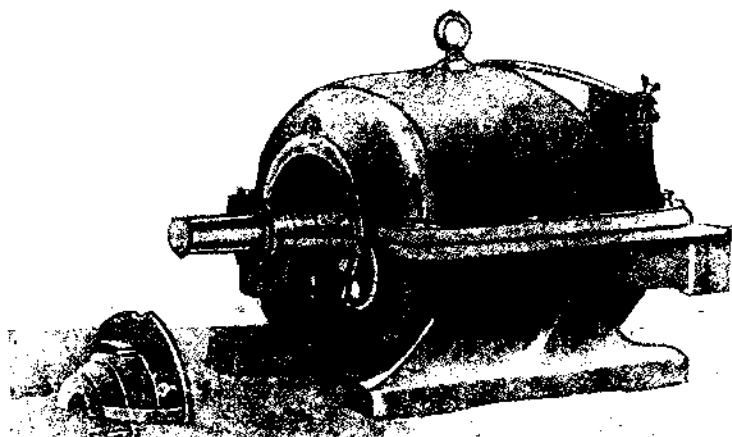
Мощность kW	750	510	440	300
Число об/мин <i>n</i>	210	185	126	116



Фиг. 261.

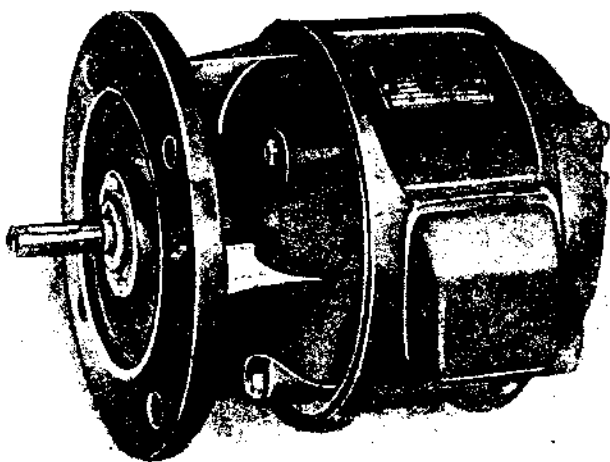
(Следует иметь в виду, что для ударной работы или при плохом уходе за подшипниками междужелезное пространство может быть

увеличено на 30—50% без уменьшения мощности и без увеличения стоимости, но, конечно, с уменьшением к. п. д., коэффициента мощности и способности к перегрузке.)



Фиг. 262.

Однако и малые двигатели выполняются с разъемными станинами для установки в местах трудной сборки и осмотра, например на кранах, главным образом в постоянном токе, где это проще выполнимо.

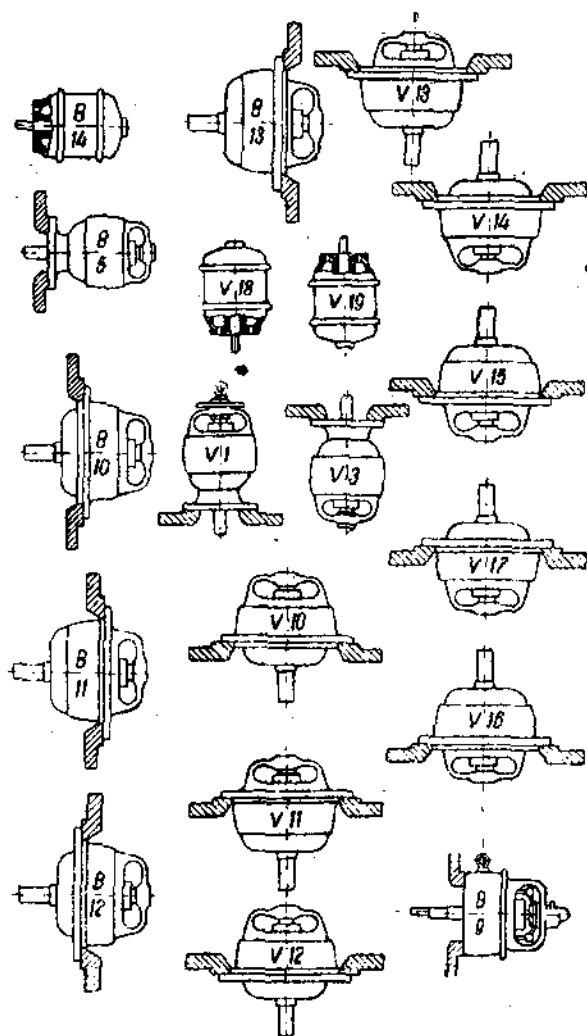


Фиг. 263.

В тех же целях облегчения ремонта станина делается разъемной и у малых трехфазных двигателей; но так как статорная обмотка не допускает разъема, то разъемным делается лишь наружный кожух (фиг. 261), а цельный статорный обод (ядро) вкладывается внутрь и привертывается болтами к внутренней поверхности кожуха.

В последнее время фирма AEG предложила другое выполнение — с разъемом лишь одних подшипников в закрытых двигателях (фиг. 262).

Далее, по форме станины, вернее — бокового щита, различаются двигатели, конструируемые для фланцевого соединения. Вид такого



Фиг. 264.

двигателя показан на фиг. 263. Применяется при установке в особо компактных конструкциях, например на лебедках, а главным образом при непосредственном соединении со станком.

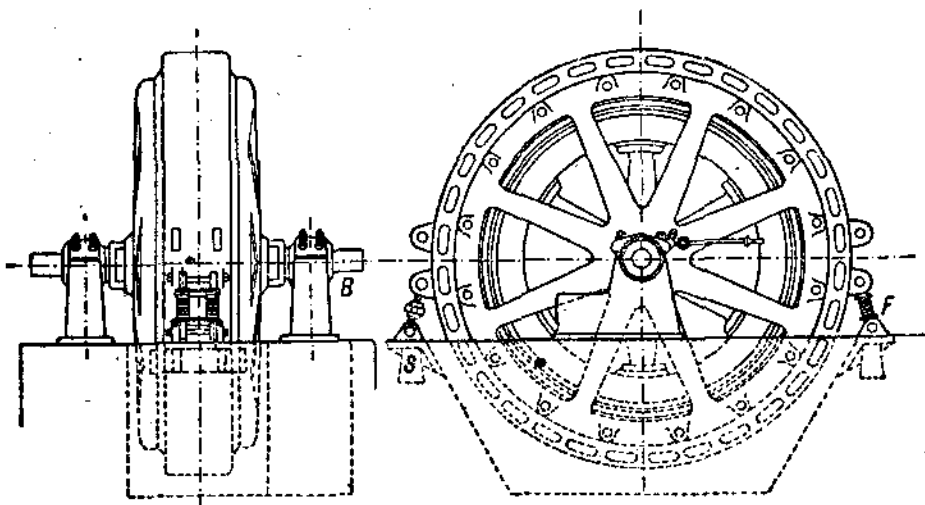
Формы эти уже нормированы (DIN VDE 2950), а жизненность этих специальных форм подтверждается введением их в каталоги (см. фиг. 264 из каталога S. S. W. МН 1928, стр. 8—9).

Укажем еще на две редко выполняемые формы станины:

а) фиг. 265 — для укрепления не на фундаменте, а на том же

валу, что и статор, помощью боковых щитов со спицами с подшипниками. Во избежание вращения статора последний соединен с фундаментом болтами z с пружиной F для восприятия толчков;

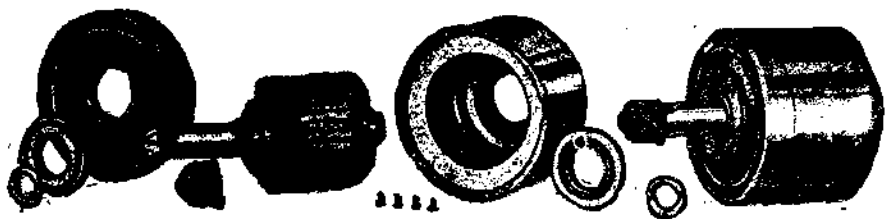
б) для установки на специальных салазках, расположенных на фундаментной плите,— статор двигателя может быть сдвигаем вле-



Фиг. 265.

ред или назад по оси, что дает возможность производить осмотр и ремонт двигателя без разборки его.

Как на особый переходный тип следует указать на двигатели



Фиг. 266.

с наружным ротором, служащим в качестве приводного шкива (фиг. 266).

Эти двигатели находят себе применение главным образом в приводе шлифовальных станков (фиг. 267), поэтому их распространение сравнительно невелико. (В последнее время они предложены для ролгангов, см. далее.) В отношении веса и стоимости они не отличаются от нормальных.

Обособленной группой по выполнению станины, фундаментной плиты и т. д. стоят двигатели, изготавливаемые комплектно с передачей, вспомогательными приспособлениями (редукторами, пусковым аппаратом) или даже с машиной—орудием в целом (см. поз. „д“):

А) Комплектное выполнение с передачей имеет целью получить дешевые и компактные тихоходные двигатели для непосредственного соединения с тихоходными машинами, используя все преимущества быстроходных, т. е. высокий к. п. д., малый вес, малые размеры и стоимость. Наиболее распространенными являются выполнения двигателей:

а) с зубчатой передачей (фиг. 273 и 274);

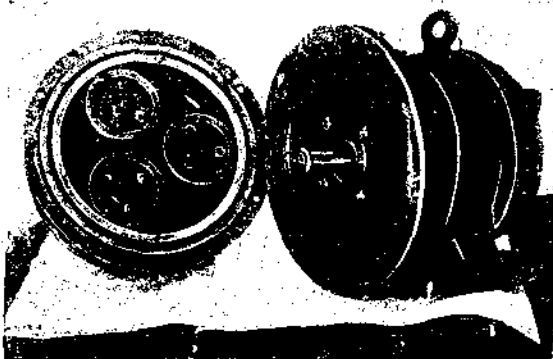
б) с червячной передачей;

в) с центратор-передачей (фиг. 268 и фиг. 427, гл. VIII);

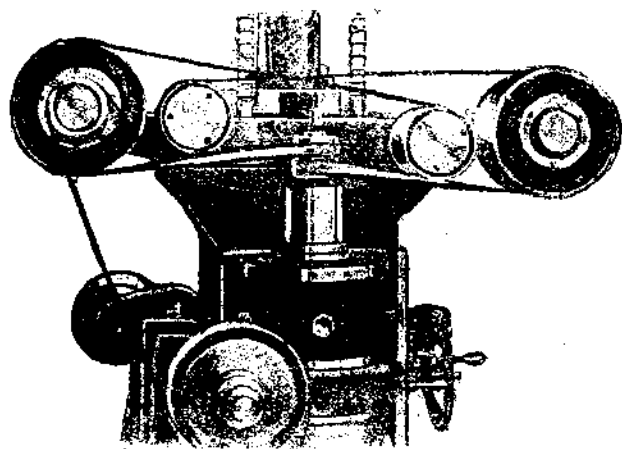
г) с роликовой передачей (фиг. 269).

Последние два типа строятся только на малые мощности: с центратор-передачей до 10 kW, с роликовой до 7,5 kW.

Быстрое распространение (Vorgelegemotoren) двигателей с встроенными передачами повидимому не является временным и случайным, так как имеет под собой указанные уже преимущества стоимости, веса, к. п. д. и габарита.



Фиг. 268.



Фиг. 267.

В таблице 36 дается сравнение стоимости открытых фланцевых трехфазных двигателей Сименс-Шуккерт (без передачи) и комплектных к ним шевронной передачи 3,5:1, 5:1 или короб с двумя передачами 12:1 и до 18:1 (Preisliste M. 7 g, стр. 28—29).

Аналогичные передачи имеются типа РА для закрытых двигателей. Надо заметить, что при шевронных колесах нормальным направлением

вращения является вращение в сторону острия „елки“ >. При обратном вращении масло греется.

Комплектное изготовление двигателя с передачей обеспечивает правильность ее установки, чего нельзя сказать про независимую передачу, особенно смонтированную не на общей фундаментной плите, где возможные перекосы несомненно отразятся на понижении к. п. д.

ТАБЛИЦА 36.

Стоимость фланцевых зубчатых передач фирмы Сименс-Шукерт.

Двигатель		П е р е д а ч и			
		Тип RA-I	Тип RA-II	Тип RA-III	Тип RA-IV
Мощность откры- тых фланцевых трехфазных при- вателей при 1500 об/мин.	Стоимость в германских марках	$i^*) = 1 : 1$ до $3,5 : 1$	$i = 3,5 : 1$ до $5 : 1$	$i = 5 : 1$ до $12 : 1$	$i = 12 : 1$ до $18 : 1$
8,5	445	860	955	1460	1680
11	615	930	1030	1560	1860
15	860	985	1110	1700	2060
22	1160	1150	1280	1950	2360
30	1450	1340	1480	2200	2710
40	1770	1530	1700	2520	3140
50	2150	1770	1960	2860	3490
64	2550	2000	2240	3330	3970
80	3050	2350	2630	3880	4600
100	3400	2580	2930	4480	5250
135	3850	2960	3300	5260	по запросу

*) Определение передаточного числа i — см. примечание к букве i в списке условных обозначений в начале книги.

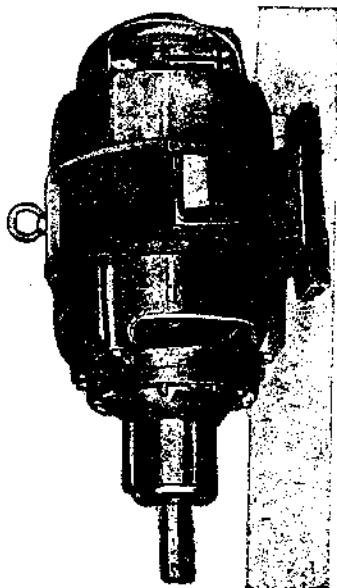
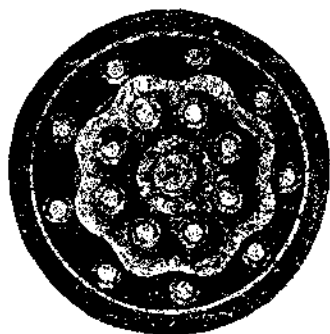
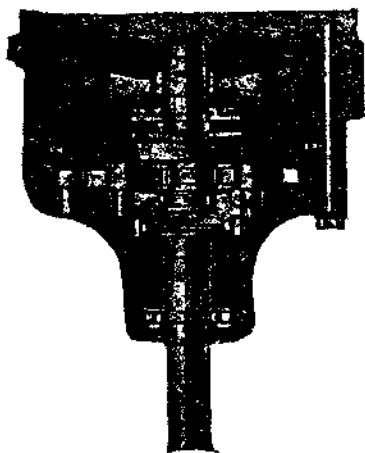
Кроме того, как видно из фиг. 270, комплектное изготовление дает 50% экономии занимаемой кубатуры (габарита). Жирными линиями изображены габариты комплекта-двигателя с передачей 15 kW 380 V. 1500/360 об/мин, а тонкими — двигателя той же мощности с независимой передачей 1500/360 об/мин.

Судя по данным фирмы Сименс-Шуккерт (фиг. 277), к. п. д. роликовых передач чрезвычайно высок. На фиг. 271 представлены кривые к. п. д. в зависимости от нагрузки в процентах трехфазного короткозамкнутого двигателя мощностью 4 kW при 1400/204 об/мин, с передачей и без нее. Особого внимания заслуживает компактность роликовой передачи, явствующая из фиг. 272. Жирными линиями даны габариты электродвигателя мощностью 2,2 kW 380 V 50 пер. 1500 об/мин, с роликовой передачей, а тонкими — фланцевого двигателя той же мощности с встроенной зубчатой передачей. Длина последнего на 20% больше, тогда как выше (из фиг. 270) было видно, что она на 25% меньше длины нормального двигателя с независимой зубчатой передачей.

Все крупные электротехнические фирмы в настоящее время организовали массовое изготовление двигателей комплектно с передачей и выпустили специальные каталоги, например фирма AEG Pr., Bl. G. 6/1014, январь 1930, фирма S. S.-W. Preisliste, M. 7g, март 1930 (Anbau-Vorgelegemotoren).

Фирма AEG предлагает передачи двух родов:

1) Универсальные зубчатые передачи с передаточным числом $i = 3/1$ до $7/1$ формы K и L на раме, на которой устана-



фиг. 269.

вливается двигатель нормального типа. Имеется 4 размера передач 0, 1, 2 и 3 (см. табл. 37).

ТАБЛИЦА 37.

Величина	0	1	2	3	Род зубцов
Мощность двигателя	до 1 kW	3 kW	7 kW	11 kW	
Стоимость без двигателя в герм. марках	117	170	260	370	С прямыми зубцами
	148	210	300	460	С шевронными зубцами

Основные размеры видны из фиг. 274 и табл. 38.

ТАБЛИЦА 38.
Размеры универсальных зубчатых передач

Величина	$a_{\max}$		b	c	d	e	g		h	$i_{\min}$	k		l	m	n	o	p	q	q_1
	K	L					K	L			K	L							
0	145	298	375	18	20	415	240	390	160	70	365	515	60	100	35	280	315	260	40
1	225	375	425	28	30	475	350	500	195	100	530	680	100	115	45	362,5	390	320	50
2	265	415	580	30	40	630	400	550	240	118	625	775	125	140	55	450	480	400	70
3	296	496	725	30	50	775	450	650	280	134	720	920	150	160	65	510	560	525	70

2) Универсальные передачи для фланцевых двигателей с передаточным числом i до 12/1 и до 30/1 типа WMK и WMM с роликовыми подшипниками и типа HM, HMC и HMF с обыкновенными (Oleitlager).

ТАБЛИЦА 39.

Стоимость зубчатых передач AEG.

Т и п	WMK-25	WMK-30	WMK-35	WMK-45	WMK-55	WMK-65	WMK-75	WMK-85
$P : n$	0,05	0,01	0,018	0,03	0,06	0,12	0,25	0,6
Стоимость в германских марках при передаточном числе:								
$i = 12:1$	243	270	351	459	621	864	1134	—
$i = 30:1$	—	324	360	432	540	756	1035	1494

Для выбора величины служит отношение $\frac{P}{n_1}$, где P — мощность

в л. с., а n — число оборотов в 1 мин. на валу передачи (см. табл. 39). Основные размеры видны из фиг. 273 и табл. 40.

Специальные передачи НМ:

В табл. 41 даны стоимости в германских марках специальных фланцевых передач AEG (без двигателя и без масла) для различных скоростей на конечном валу от 90 до 15 об/мин.

Такие же специальные фланцевые передачи изготавливаются для двигателей постоянного тока и для двигателей закрытых с охлаждаемым кожухом. Основные размеры видны из фиг. 275 и табл. 42.

Сравнение двигателей со встроенными редукторами и нормальных быстроходных указывает на большую стоимость первых в среднем на 75% при увеличении веса в общем на 25%. На фиг. 276 приведена кривая удорожания и увеличения веса двигателей с зубчатым редуктором, изготавливаемым иностранными фирмами.

И Ц А 38.

фирмы AEG типов K и L (в миллиметрах).

r	s	t	u	v _{max}		С а л а з к и										Фунд. болты		
				K	L	№	E	H	L	N	Q	R	T	Y	№	Q ₁	T ₁	
337	1 1/2"	22,5	6	215	365	4/450	—	50	450	570	50	520	175	150	1 1/2"	AEG361	95	170
390	1 3/8"	33	8	325	475	7/600	—	60	600	730	50	680	200	175	1 1/2"	AEG361	95	170
525	1 7/8"	43,5	12	383	533	11/800	120	65	800	845	60	550	203	210	5/8"	AEG361	110	200
655	2 1/4"	54	14	430	630	14/1000	120	70	1000	1055	60	750	200	240	5/8"	AEG361	130	220

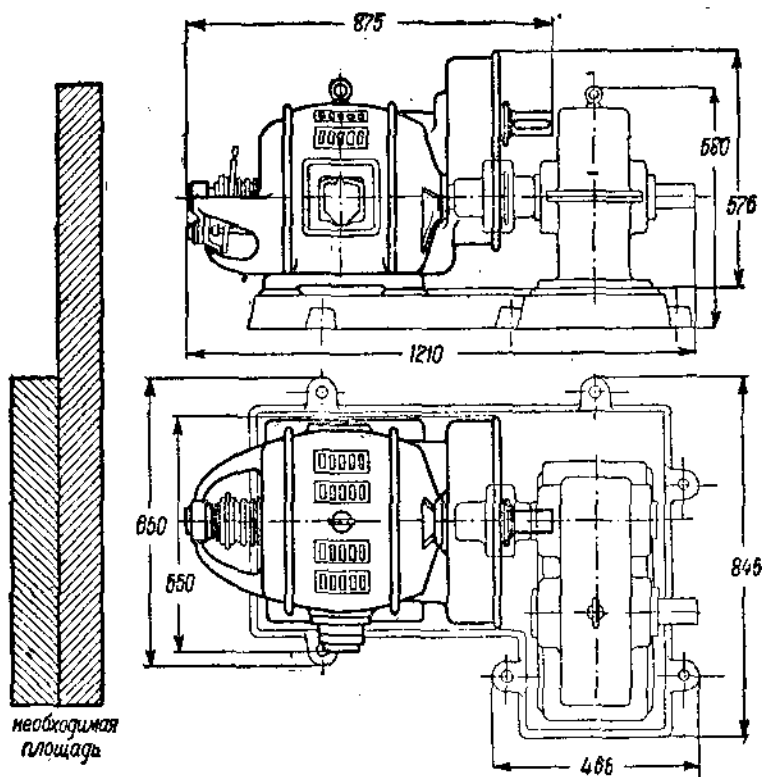
ТАБЛИЦА 40.

Размеры универсальных фланцевых зубчатых передач фирмы AEG типов WMK и WMM в миллиметрах.

Модель	a	b	c	d	e	f	g	h	i	m	q	s	t	u	x
WMK-25	160	180	20	25	200	220	210	120	65	70	160	12	28	8	20
WMK-30	190	210	20	30	230	250	230	140	80	85	190	12	33	8	20
WMK-35	220	230	25	35	270	280	250	160	90	95	220	15	38,5	10	25
WMK-45	250	270	25	45	300	320	300	180	110	115	250	15	49	14	25
WMK-55	290	310	25	55	340	360	340	220	130	135	290	15	60	16	25
WMK-65	330	360	30	65	390	420	400	290	160	165	330	18	70	18	30
WMK-75	380	440	30	75	440	500	480	330	180	185	380	18	81	20	30
WMM-30	190	240	20	30	230	280	260	160	80	85	190	12	33	8	20
WMM-35	220	240	25	35	270	340	320	200	90	95	220	15	38,5	10	25
WMM-45	250	330	25	45	300	380	360	230	110	115	250	15	49	14	25
WMM-55	290	370	25	55	340	420	400	270	130	135	290	15	60	16	25
WMM-65	330	420	30	65	390	480	450	310	160	165	330	18	70	18	30
WMM-75	380	500	30	75	440	560	540	370	180	185	380	18	81	20	30
WMM-85	440	620	40	85	520	700	680	450	210	215	440	22	92	24	40

ТАБЛИЦА 41.

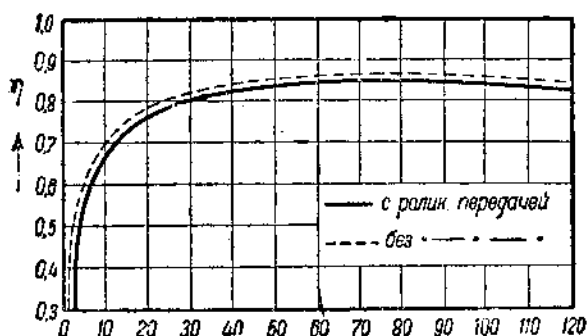
Тип Мощность л. с.	НМ $n_{\min} = 60-90$	НМС $n_{\min} = 30-40$	НМР $n_{\min} = 15-40$
0,5	НМ- 0,5 — 238	346	464
1	НМ- 1 — 346	517	693
1,5	НМ- 1,5 — 437	644	853
2	НМ- 2 — 517	763	1 021
3	НМ- 3 — 614	913	1 210
4,5	НМ- 4,5 — 743	1 110	1 478
6	НМ- 6 — 803	1 190	1 588
7,5	НМ- 7,5 — 853	1 189	1 708
10	НМ-10 — 1 190	1 775	2 340
12	НМ-12 — 1 208	1 944	2 599
16	НМ-16 — 1 526	2 286	3 069
20	НМ-20 — 2 268	3 510	5 256



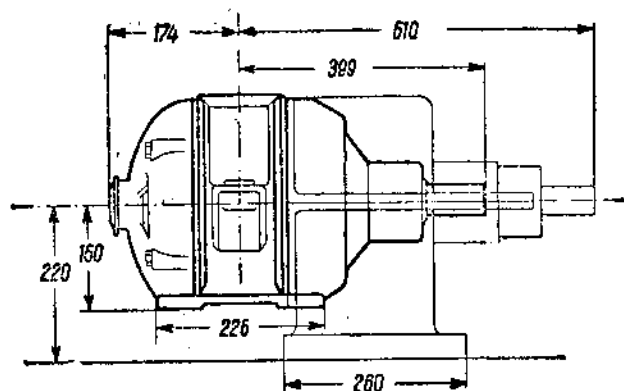
Фиг. 270.

В отношении к. п. д. двигатели с редукторами не уступают установкам с быстроходными двигателями и независимыми передачами,

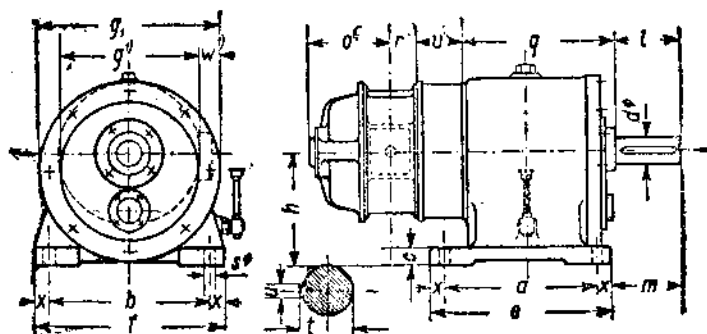
в чем нетрудно убедиться по приведенным на фиг. 277 сравнительным кривым к. п. д. встроенных редукторов: зубчатых (кривая а),



Фиг. 271.



Фиг. 272.



Фиг. 273.

червячных (кривая б) и роликовых (кривая с), с передаточным числом 1420/129 об/мин. для мощности до 1 kW.

Размеры зубчатых передач

Размеры Модель	a	b	c	d	e	f	g	h	i
HM- 0,5	150	180	12	25	190	210	207	132	50
HM- 1	170	220	14	30	210	260	217	180	60
HM- 1,5	180	240	14	32	220	280	238	205	65
HM- 2	205	260	15	35	240	300	258	215	70
HM- 3	220	280	18	40	260	320	278	220	80
HM- 4,5	250	310	20	45	300	360	300	240	90
HM- 6	270	310	20	50	320	360	310	255	100
HM- 7,5	280	330	20	55	330	380	325	255	100
HM-10	300	350	24	60	360	400	342	295	110
HM-12	320	380	24	65	380	440	362	300	120
HM-16	340	390	26	70	420	450	382	320	120
HM-20	325	450	28	75	440	520	418	360	110
HMC- 0,5	140	210	12	25	170	240	207	175	50
HMC- 1	160	264	15	30	200	300	217	230	60
HMC- 1,5	180	280	18	35	220	320	238	240	70
HMC- 2	190	370	22	40	250	420	258	310	70
HMC- 3	240	380	22	45	290	430	278	310	80
HMC- 4,5	270	430	22	50	320	480	300	350	90
HMC- 6	255	450	22	55	340	500	310	400	100
HMC- 7,5	310	480	22	60	360	530	325	405	90
HMC-10	300	520	26	65	400	600	342	440	100
HMC-12	345	520	26	70	450	600	362	440	105
HMC-16	365	540	28	75	480	620	382	475	110
HMC-20	375	580	30	85	510	660	418	500	125
HMW- 0,5	194	260	12	40	230	300	207	180	70
HMW- 1	240	310	15	50	300	360	217	180	80
HMW- 1,5	240	320	18	55	290	370	238	205	90
HMW- 2	265	370	20	60	350	420	258	225	90
HMW- 3	280	380	20	65	330	440	278	240	100
HMW- 4,5	330	510	22	70	430	560	300	290	105
HMW- 6	320	540	22	80	370	590	310	325	130
HMW- 7,5	390	530	22	85	500	590	325	320	125
HMW-10	460	580	24	90	575	640	342	340	130
HMW-12	480	610	25	100	540	680	362	360	160
HMW-16	500	720	28	110	650	800	382	400	160
HMW-20	520	780	32	120	700	860	418	450	170

Коэффициент полезного действия самостоятельных передач не выше приведенных в главе о передачах приводов, установка же будет лишена компактности и удобства.

Для сравнения ниже (в табл. 43) приведены полученные в Лаборатории электроприводов Электротехнического института им. Ленина данные двух двигателей постоянного тока, мощностью 1,1 kW,

АЕГ для встроенных двигателей (фиг. 275).

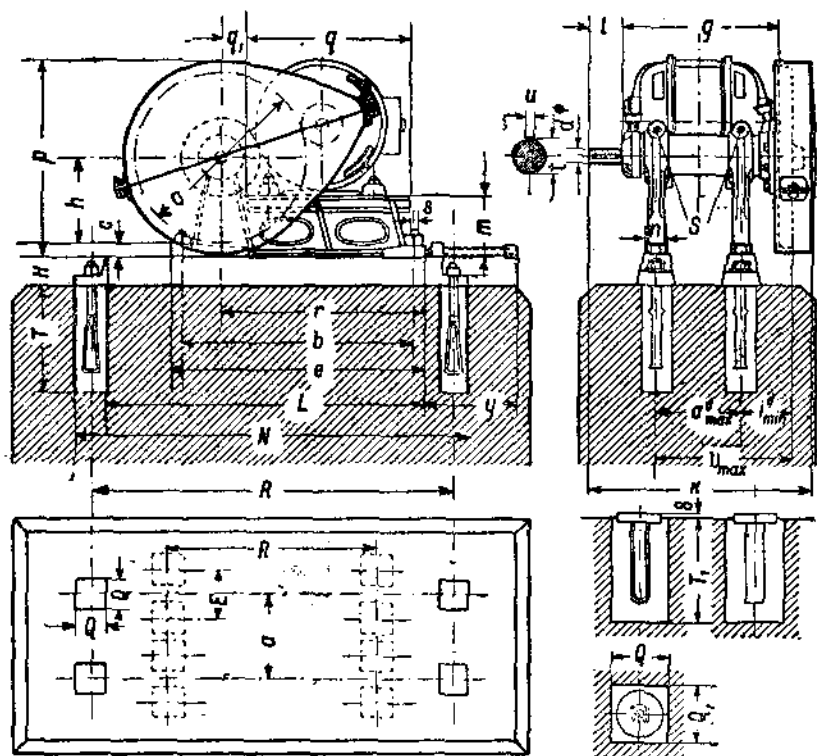
О		р	q	r	s	t	x	y	z	и
кор. зам.	с колыц.									
115	256	260	315	38	11	28	15	15	25	8
125	256	325	376	50	14	33	20	20	20	8
134	256	360	402	45	14	35	20	20	20	10
156	—	385	444	48	14	38	17	20	17	10
175	256	405	491	62	14	43	20	20	20	12
195	268	430	558	62	17	49	25	25	25	14
211	275	450	598	67	20	54	25	25	25	14
221	320	460	637	74	20	60	25	25	25	16
238	344	520	681	76	20	65	30	25	30	18
256	356	530	742	85	20	70	30	30	30	18
261	374	565	800	97	20	76	40	30	40	20
266	405	625	780	100	24	81	35	35	80	20
115	—	315	318	39	10	28	15	15	15	8
125	—	400	407	44	14	33	20	18	20	8
134	—	415	442	45	14	38	20	20	20	10
156	—	525	457	48	17	43	30	25	30	12
175	256	540	506	52	17	49	25	25	25	14
195	268	600	575	61	17	54	25	25	25	14
211	275	660	625	75	20	60	25	25	60	16
221	320	685	648	70	20	65	25	25	25	18
238	344	745	706	75	20	70	40	40	60	18
256	356	745	770	85	24	76	40	40	65	20
261	374	790	810	85	24	81	40	40	75	20
266	405	840	885	90	26	92	45	40	90	24
115	—	300	438	37	14	43	16	20	20	12
125	—	330	525	45	14	54	25	25	35	14
134	—	360	544	45	17	60	25	25	25	16
156	—	440	590	45	17	65	25	25	60	18
175	256	420	632	62	17	70	20	30	30	18
195	268	490	740	65	20	76	30	25	70	20
211	275	550	793	118	17	87	25	25	25	24
221	320	550	905	70	22	92	30	30	80	24
238	344	580	975	80	22	97	40	30	75	24
256	356	620	1020	90	24	108	35	35	75	28
261	374	675	1130	100	26	118	60	40	90	28
266	405	740	1190	100	26	129	80	40	100	32

быстроходного с зубчатым редуктором 1500/120 об/мин и тихоходного 120 об/мин, из которых видно бесспорное преимущество первого.

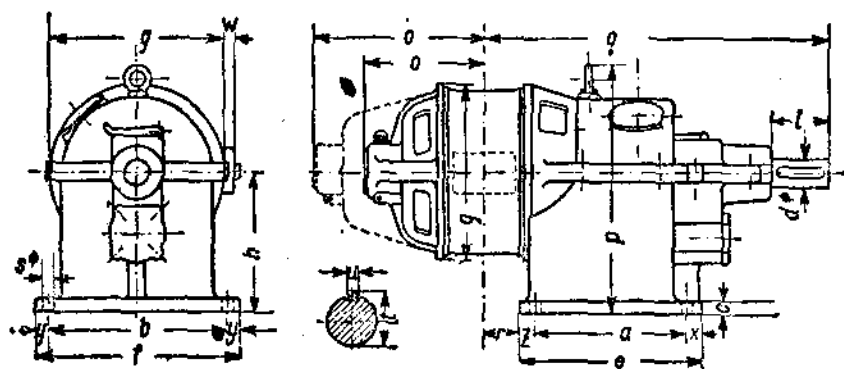
Б) Комплектное выполнение с пусковым устройством. На фиг. 278 изображен такой двигатель фирмы Сименс-Шуккерт 30 kW с зубчатым редуктором 1450/200 об/мин. Пусковой аппарат в виде контроллера смонтирован сверху станины.

ТАБЛИЦА 43.

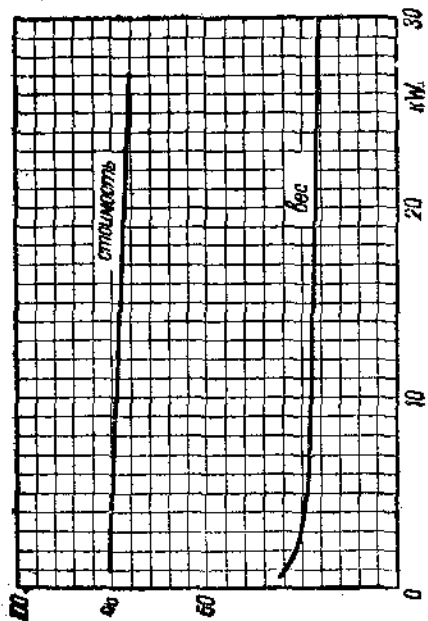
Т и п	Вес kg	Стоимость руб.	К. п. д. при $\frac{1}{4}$ нагр. $\theta/10$
Быстроходный с зубчатым редуктором 1500/120 об/мин.	62	310	78
Тихоходный 120 об/мин.	420	1 650	55



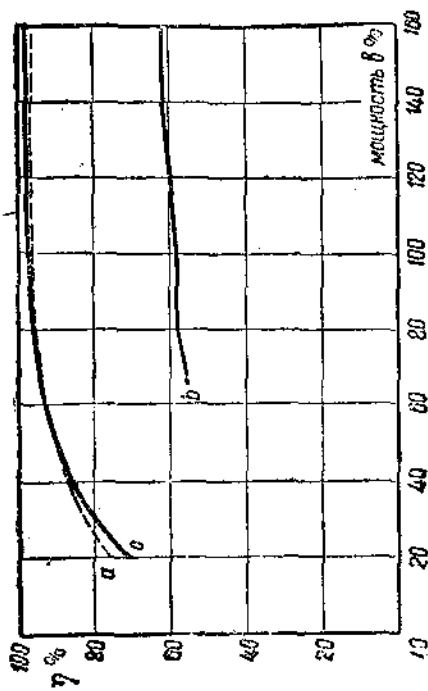
Фиг. 274.



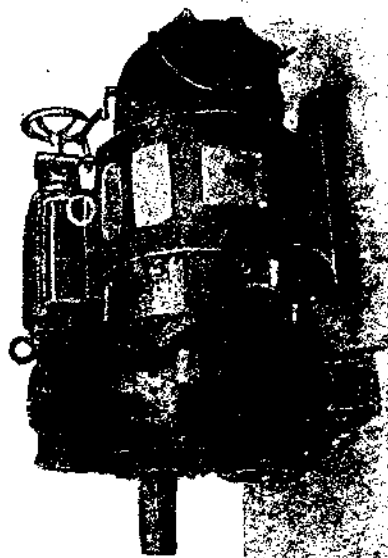
Фиг. 275.



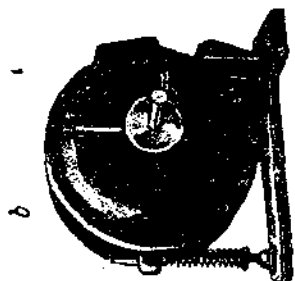
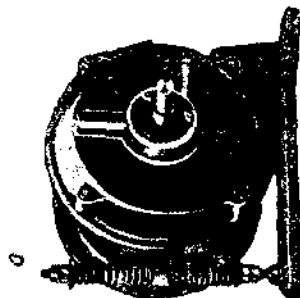
Фиг. 276.



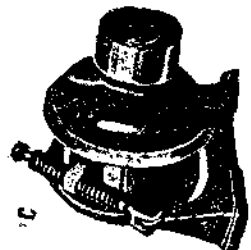
Фиг. 277.

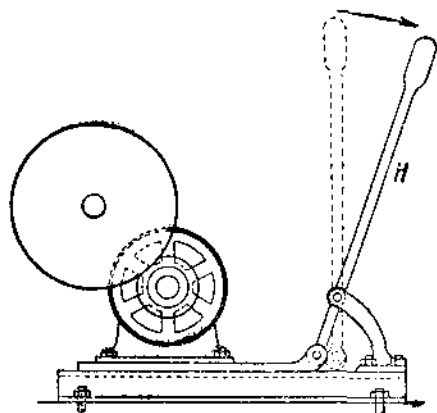


Фиг. 278.



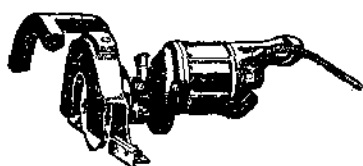
Фиг. 279.



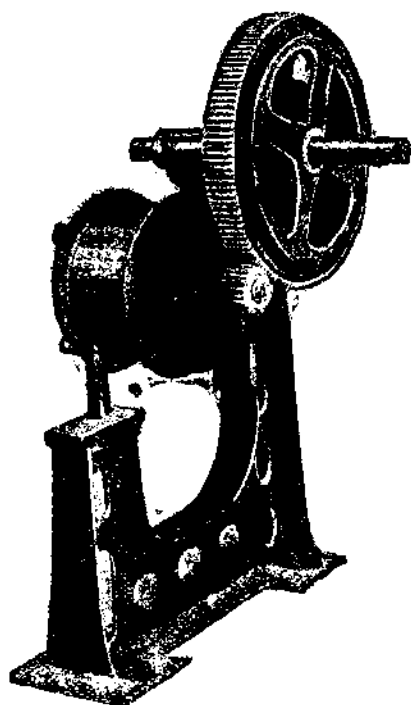


Фиг. 280.

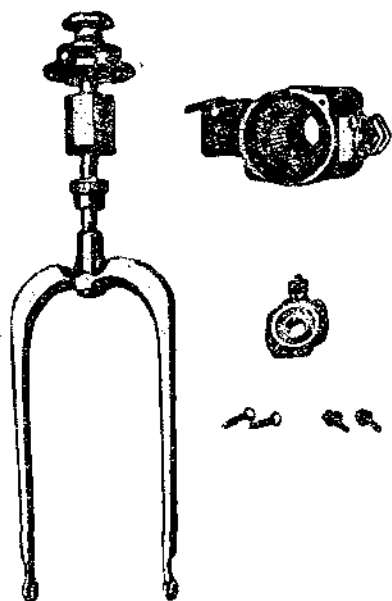
В) Специальное выполнение станины и салазок для наилучшего приспособления к приводу: например, при вертикальном и косом ремennem приводе — качающиеся салазки (фиг. 279, а, б, с), при фрикционном приводе (напри-



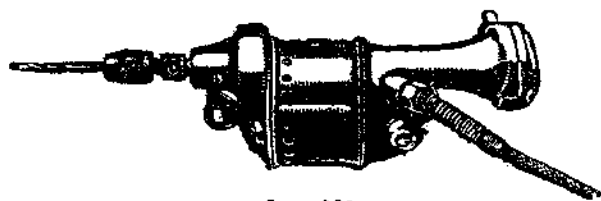
Фиг. 283.



Фиг. 281.



Фиг. 284.



Фиг. 282.

мер типографские печатные машины) — горизонтально передвигаемые обыкновенные салазки (фиг. 280), или при зубчатом соединении (фиг. 281), как это применяется при

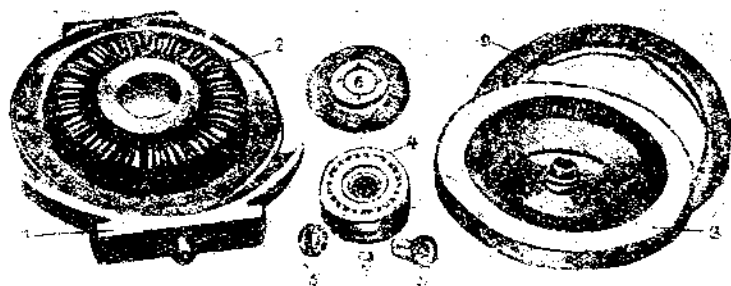
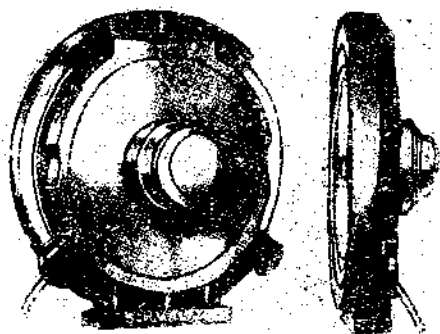
электрификации ткацких станков в целях наибольшей точности соединения.

Г) Наконец, при непосредственном соединении двигателя с машиной-орудием для достижения наибольшей компактности двигатель выполняется как часть машины-орудия. Наиболее яркие примеры мы видим в конструкциях переносных сверлильных машин (фиг. 282), ручных циркульных пил (фиг. 283), прядильных ватеров по системе Шнейдер, где двигатель приобретает роль веретена или рогульки (фиг. 284), в шлифных машинах (фиг. 285).

§ 7. Число и типы подшипников.

Еще конкретнее, чем на станине, влияние величины вращающего момента $M = k \frac{P}{n}$ сказывается на числе и типе подшипников (поз. „е“ классификации).

I. Нормальным числом подшипников является, конечно, два; однако при ремен-



Фиг. 285.

ном приводе оно оказывается нормальным только до определенного значения момента вращения, свыше которого нормально ставится три (см. ниже данные каталогов).

Для приводов непосредственного соединения крупных станков (прокатных) или в горном деле (вентиляторов, насосов) двигатели выполняются без подшипников для установки на плите и в готовых подшипниках машины-орудия.

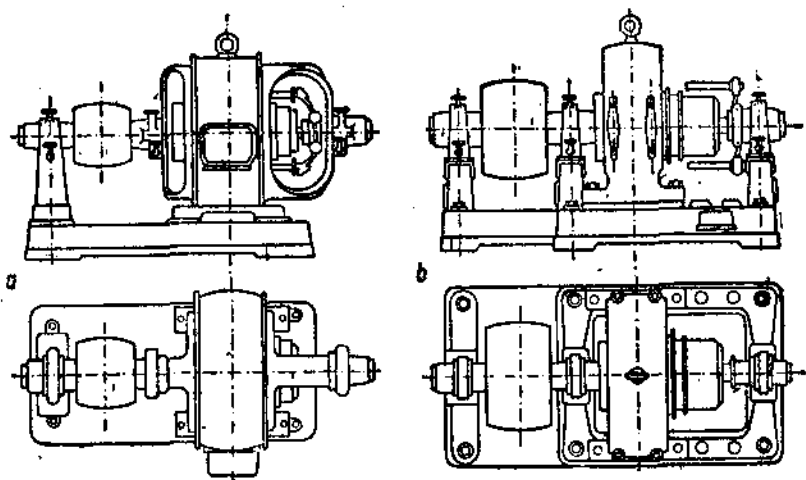
II. Тип подшипников определяется следующими факторами:

- а) родом трения — скольжения или качения;
- б) расположением вала — горизонтальным или вертикальным (подпятники);
- в) расположением подшипника по отношению к двигателю — в боковом его щите, или независимо от двигателя на общей фундаментной плите или собственной;

- д) характером смазки — маслом (самосмазывание кольцами, цепочкой или под давлением) или жиром (Штауферовской масленкой);
- е) отливкой — цельной или разъемной как самого подшипника, так и вкладыша;
- ф) охлаждением — естественным или водяным при крупных размерах.

Из этого перечисления видно, какое разнообразие и, следовательно, осложнение могут внести в эксплуатацию электрооборудования завода одни только подшипники, если при выборе электродвигателей возможное „единообразие“ не будет поставлено руководящим фактором.

Какие же конструкции являются нормальными в производстве двигателей? По расположению и числу, согласно каталогам наиболее крупных фирмы, подшипники нормально выполняются:



Фиг. 286.

либо в щитовых крышках, либо в виде отдельных подшипников в зависимости от передаваемого усилия — не мощности, а момента $M = k \frac{P}{n}$ — причем несколько различного для постоянного и переменного тока:

а) для двигателей постоянного тока подшипники устраиваются в двух боковых щитах (фиг. 249, 253, 264, 286, а) до максимальной мощности $P_{\max} = 200 \text{ kW}$ при 800 об/мин и $P_{\max} = 100 \text{ kW}$ при 530 об/мин и до минимальной скорости около $n = 200$ об/мин и 50 kW, т. е. в среднем до величины момента

$$M = 975 \frac{P}{n} = 250 \text{ kgm.}$$

За этим пределом подшипники нормально выполняются в виде независимых (286, б). Однако при ременном приводе и во всех случаях уменьшения диаметра шкива более чем на 25% от указанных

в каталогах размеров предел наступает несколько ранее, а именно: начиная с мощности 150 kW при 620 об/мин, т. е. с момента

$$M = 950 \frac{150}{620} = 220 \text{ kgm.}$$

В тех случаях, когда привод требует применения приводных шкивов большой ширины, двигатель снабжается третьим подшипником, как показано на фиг. 286, б. В случае канатной передачи третий подшипник обязателен.

Наличие третьего подшипника вызывает увеличение веса и стоимости двигателя, а также уменьшение его к. п. д. Так, по данным завода Brown-Boveri вес двигателя и фундаментной плиты повышается на 20—30%, а стоимость их — на 10—13%. По данным фирмы ASEA увеличение стоимости составляет около 20%.

Уменьшение к. п. д. может быть иллюстрировано табл. 44:

ТАБЛИЦА 44.

Загрузка двигателя	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{1}{4}$
Уменьшение к. п. д. на	30%	30%	50%	80%	130%

Даваемые каталогами размеры шкивов можно менять в сторону уменьшения только на 10—20% при одновременном уширении шкива, так как при этом напряжение в подшипнике меняется. Например, для электродвигателя мощностью 10 kW при $n = 1500$ об/мин нормальный диаметр шкива равен 175 мм.

Скорость ремня

$$v = \frac{0,175 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 13,75 \text{ m/sec,}$$

а так как мощность электродвигателя $P = 10 \times 102 = 1020 \text{ kgm/sec}$, то сила тяги ремня

$$F = \frac{1020}{13,75} = 74 \text{ kg;}$$

следовательно, полное давление на подшипник (со стороны ведущей части $= 2F$ и со стороны ведомой $= 1F$) равно $3F = 3 \times 74 = 222 \text{ kg}$.

Если уменьшить диаметр шкива до 100 мм, то

$$v = \frac{0,100 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 7,85 \text{ m/sec;}$$

$$F = \frac{1020}{7,85} = 130 \text{ kg.}$$

и полное давление на подшипник $3F = 3 \times 130 = 390 \text{ kg}$, т. е. больше на 75%.

Для двигателей трехфазного тока область нормального применения щитовых подшипников несколько выше и кончается следующими мощностями (табл. 45):

ТАБЛИЦА 45.

Скорость об/мин \ Мощность P, kW	1 000	750	500	375	300	250	214	188
По данным Сименс-Шуккерт	650	550	400	265	185	100	70	0
По данным AEG (для шкива)	—	—	—	110	—	70	0	0
По данным AEG (для муфты)	—	—	—	185	165	70	0	0

Цифры этой таблицы в среднем дают для момента:

$$M = 975 \frac{P}{n} = 600 \text{ kgm.}$$

При больших моментах вращения нормально выполняются стоячие подшипники.

Третий подшипник применяется для ременного привода (фиг. 286), начиная со следующих мощностей (в kW, см. таблица 46):

ТАБЛИЦА 46.

Потребная мощность P, kW \ n об/мин	500	375	300	250	215	187	167	150
По данным фирм								
Сименс-Шуккерт	175	110	55	40	—	—	—	—
AEG	—	130	70	—	—	55	50	45

т. е. в среднем, начиная от значения момента

$$M = 975 \frac{P}{n} = 975 \frac{120}{375} = 300 \text{ kgm,}$$

причем подшипник устанавливается либо на собственной, либо на общей фундаментной плите.

По данным каталога № 23 Brown-Boveri, предел наступает значительно ранее: при $M = 180 \text{ kgm}$.

По роду трения и отливки нормальной и наиболее распространенной формой является чугунный подшипник скользящего трения I рода, с вкладышем из бронзы или из чугуна, с заливкой белым металлом.

Для крупных мощностей подшипники нормально выполняются

разъемными и с регулировкой установки вкладыша. В последнем случае вкладыши устанавливаются на шарообразных опорах, так что нижняя половина может быть легко повернута для осмотра без нарушения положения вала.

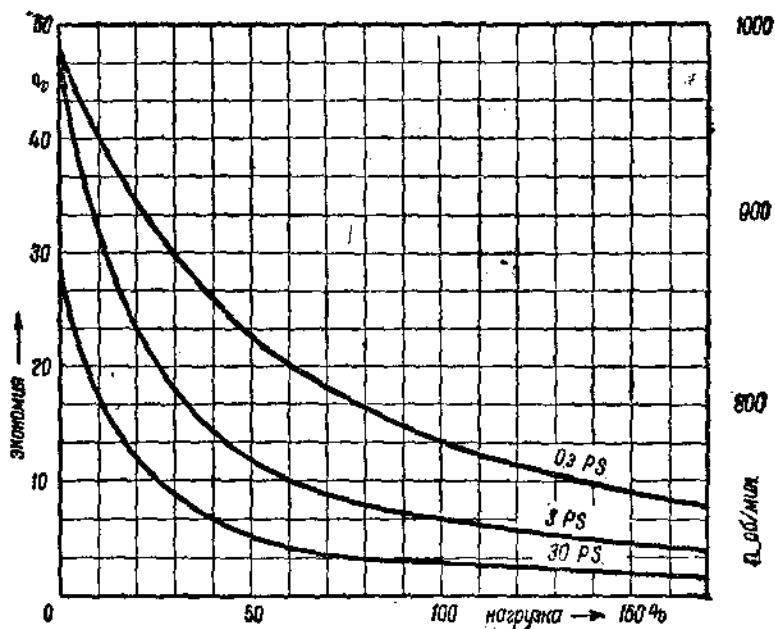
Надо заметить здесь, что для предотвращения между цапфой и вкладышем блуждающих токов (вследствие магнитной дисимметрии разъемного по горизонтали статора), что может вызвать разъедание цапф, подшипники изолируются от фундаментной плиты прокладками, а уравнильные токи отводятся от вала особыми щетками. Такая конструкция применена Харьковским заводом при построении в 1922 г. трехфазного электродвигателя на 3000 В мощностью 2000 л. с. при 215 об/мин для прокатного стана Днепро-Петровского завода.

Однако в целях облегчения ремонта в трудно доступных местах (на кранах) разборные подшипники применяются и в мелких двигателях (фиг. 262).

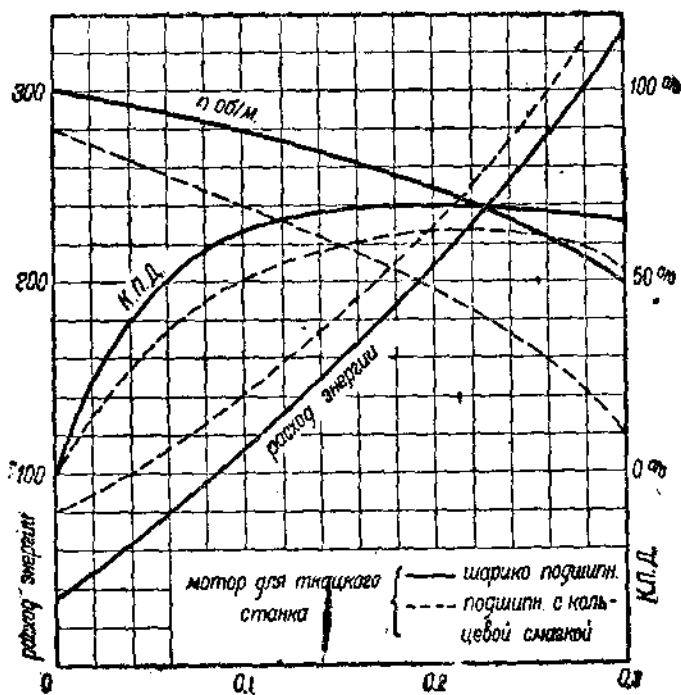
Смазка подшипников производится нормально кольцами (реже — цепочками): одним кольцом при малых подшипниках длиной до 300 мм, выше — двумя. При весьма мощных быстроходных двигателях масло подается под давлением помощью особого масляного насосика, соединенного с валом двигателя. Смазка двигателей, подвергаемых сильным сотрясениям, а также переносных, естественно не может выполняться жидким маслом, а выполняется густым жиром, закладываемым в особые Штауферовские масленки.

При установке двигателя на стене или на потолке надо предвидеть необходимость соответствующего поворачивания боковых щитов на 90° или на 180° ; поворот на 90° возможен только при числе болтов, кратном 4, что не всегда имеет место.

Подшипники трения II рода „шариковые“ и „роликовые“ широко применяются пока только для малых и быстроходных двигателей, где выгода их особенно велика. Шариковые подшипники требуют минимальной смазки, вследствие чего могут долгое время работать без надзора. Отсутствие масляной ванны, имеющейся в подшипниках с кольцевой смазкой, делает шариковые подшипники чрезвычайно компактными и позволяет герметически изолировать их от окружающей среды; это же обстоятельство позволяет производить монтаж двигателя в наклонном положении (на стене), а равно и подвеску его к потолку без поворачивания боковых щитов на 90° и 180° . Проводимая в настоящее время международная стандартизация шариковых подшипников вносит в эксплуатацию их чрезвычайное удобство — возможность замены подшипником другой, даже иностранной, фирмы. По многочисленным данным, повышение стоимости двигателя от введения шариковых подшипников составляет менее 10% даже для весьма малой мощности, что конечно окупается увеличением его эксплуатационных качеств, как видно из сравнения кривых, даваемых зав. Ламейер (фиг. 287а) для трех двигателей в 0,22 kW (0,3 PH), 2,2 kW (3 PH) и 22 kW (3,0 PH), причем экономия в расходе энергии выражена в процентах в зависимости от загрузки двигателей. Так, по испытаниям этой фирмы трение в шариковых подшипниках составляет около 2% полной мощности, в то время как в обычных — около 6% для двигателя 0,75 kW, около 4% для двигателя 3,5 kW и около 3% для двигателя до 7,5 kW.



Фиг. 287 а.



Фиг. 287 б.

Таким образом, особое значение эти подшипники приобретают в установках с большим числом малых быстроходных двигателей, например на ткацких фабриках при одиночном приводе мощностью 0,15—0,37 kW. Коэффициент полезного действия этих специальных двигателей (Websstuhlmotoren) доведен до 70—80%.

Из кривых (фиг. 287b) видно влияние шариковых подшипников (сплошные кривые) на повышение к. п. д., а следовательно и числа оборотов, и на понижение расхода энергии „ткацкого“ двигателя закрытого типа мощностью в 0,15 kW. „Закрытие“ при таких малых мощностях не вызывает уменьшения мощности, как видно будет из дальнейшего.

Недостатком этих подшипников является чувствительность их к ударной нагрузке и в особенности к осевому давлению; поэтому при ременном приводе следует применять их весьма осмотрительно.

Что касается охлаждения подшипников, то в подавляющем большинстве оно делается естественным, и лишь при весьма больших мощностях, когда с увеличением размеров теплопередача подшипника чрезмерно ухудшается, применяется водяное охлаждение.

Так, завод Сименс-Шуккерт предвидит водяное охлаждение для трехфазных мощных двигателей от 750 до 1650 kW при 1000 об/мин и средний расход чистой холодной воды для указанных двигателей от 60 kg/час до 90 kg/час.

§ 8. Число оборотов двигателей.

Переходим теперь к главному и последнему фактору (поз. „ж“ классификации)—числу оборотов двигателя, как наилучше определяющему тип двигателя по конструктивному выполнению и весьма тесно связанному со всеми предыдущими факторами.

Можно ли назвать какое-либо число оборотов нормальным для определенного типа двигателей?

Несомненно, что число оборотов диктуется целым рядом конструктивных соображений.

Так, в постоянном токе с увеличением числа оборотов растут железные потери, а с ними и нагрев железа, и ухудшается коммутирование, а в трехфазном токе с увеличением числа оборотов связано уменьшение числа полюсов, что изменяет соотношение активной и неактивной части катушек, причем получается чисто конструктивное затруднение укладки торцовых частей катушек.

Со стороны механической прочности двигателя бесколлекторные и особенно с короткозамкнутым ротором допускают значительно большую скорость.

Наоборот, предел для уменьшения числа оборотов, помимо веса и к. п. д., ставит коэффициент мощности, так как при увеличении числа полюсов увеличивается магнитное рассеяние.

Если обратиться к производству двигателей, то из самого общего ознакомления с каталогами мы можем видеть: 1) систематическое уменьшение числа оборотов с увеличением мощности предлагаемых каталогом и, следовательно, нормально изготавливаемых двигателей; 2) вместе с тем и для каждого типа двигателей каталог предусматривает целый ряд скоростей, причем мощность данного типа дви-

гателей падает в несколько большей степени, чем число оборотов. С уменьшением мощности наблюдается заметное падение коэффициента полезного действия (таблица 47 для типа WA завода „Вестингауз“).

Этот ряд достигается в двигателях постоянного тока изменением магнитного потока как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения его от нормальной величины.

ТАБЛИЦА 47.

Тип	Данные двигателя Скорость	Напряже- ние в вольт тах	Мощность в л. с. около	Обороты в минуту около	Потребная мощность в киловат- тах около	Потребле- ние тока в амперах около	Коэффициент полезного действия около
A 0,5	Увеличенная {	110 220 500	1,25 1,25 1,25	2 000 2 000 2 050	1,23 1,22 1,22	11,1 5,55 2,45	} 75,5%
	Средняя {	110 220 500	1,0 1,0 0,75	1 620 1 560 1 800	1,0 1,0 0,75	9,05 4,52 1,51	
	Уменьшен- ная . . . {	110 220 500	0,5 0,45 0,45	1 025 1 025 1 225	0,60 0,57 0,58	5,5 2,58 1,16	
	Малая . . . {	110 220	0,3 0,2	800 780	0,44 0,37	4,02 1,67	
A 1	Увеличенная {	110 220 500	2,5 2,25 2,5	1 700 1 825 1 900	2,25 2,03 2,25	20,4 9,2 4,5	} 81,5%
	Средняя {	110 220 500	2,0 1,75 1,75	1 400 1 500 1 500	1,83 1,62 1,61	16,5 7,35 3,22	
	Уменьшен- ная . . . {	110 220 500	0,85 0,85 0,85	925 950 1 025	0,93 0,925 0,935	8,4 4,2 1,87	
	Малая . . . {	110 220	0,7 0,6	740 725	0,83 0,74	7,5 3,35	

На основании изучения каталогов можно кривыми фиг. 288 характеризовать нормальное и наибольшее число оборотов двигателей постоянного тока различных мощностей в пределах от 1 до 300 kW. Для мощностей в 500 kW можно в среднем принять:

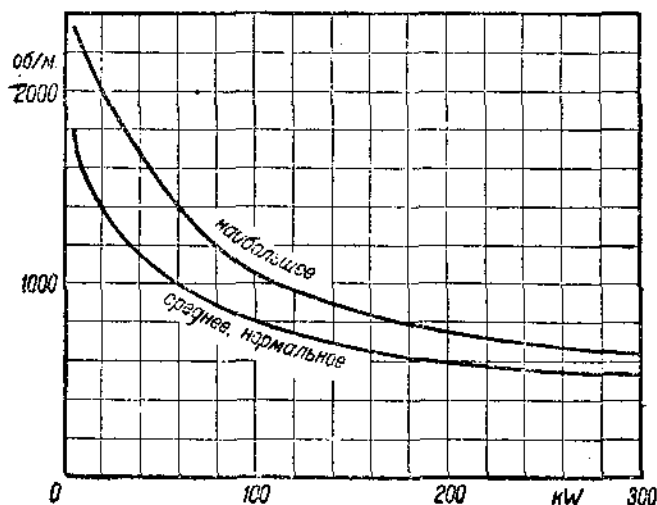
нормально	275 об/мин
максимально	550 " "
минимально	125 " "

Для двигателей трехфазного тока, по вышеуказанным конструктивным соображениям, для нормального числа синхронных оборотов можно принять цифры табл. 48.

ТАБЛИЦА 48.

Мощность kW	Число оборотов	
	50 пер/сек	25 пер/сек
1—1,5	1 500	750
1,5—40	1 000	750
40—100	750	750
100—200	600	500
200—400	600	500

Итак, из предыдущего видно, что, во-первых, для каждого заводского типа двигателей существует определенное число оборотов, которое может считаться нормальным. Во-вторых, произвольному увеличению или уменьшению числа оборотов ставят препятствия конструктивные соображения, так что нормально мы не можем иметь мощных двигателей быстроходных, например в 3000 об/мин, и малых двигателей тихоходных до сотен оборотов в 1 минуту (последнее особенно относится к моторам трехфазного тока). Наконец, в-третьих, по данным каталогов мы видим самую тесную связь между числом оборотов, размерами, весом, коэффициентом полезного действия (и коэффициентом мощности в двигателях переменного тока), связь, понятную из самого выражения



Фиг. 288.

механической мощности как произведения силы на скорость при прямолинейном движении или момента на угловую скорость — при вращательном движении. Естественно, что за счет увеличения числа оборотов получается уменьшение усилий при той же мощности и уменьшение размеров, а следовательно и веса. Таким образом стремление к производству возможно более быстроходных двигателей и машин-орудий экономически вполне понятно.

Для наглядного представления о влиянии числа оборотов на указанные свойства двигателей приведем здесь табл. 49 для двух двигателей постоянного тока мощностью 3,7 kW при 2400 и 400 об/мин фирмы „Асеа“, с главными размерами, а также кри-

вые фиг. 289 для открытых двигателей, из которых видно сильное влияние числа оборотов на коэффициент полезного действия двигателей постоянного тока.

Правда, последнее влияние менее заметно для двигателей трехфазного тока, но зато резко отражается на их коэффициенте мощности, как видно из приведенных в главе X кривых (фиг. 495) для нормальных трехфазных двигателей с контактными кольцами и короткозамкнутым ротором различной мощности при обычной в заводской практике частоте 50 пер/сек.

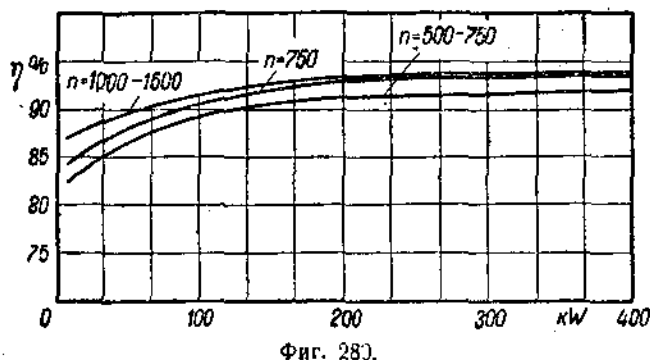


ТАБЛИЦА 49.

(Фиг. 293.)

Тип	Мощность	A	L	v ширина	p высота	К.п.д.	Вес kg	Цена руб.
		(длина)						
К. 3	3,7kW при 2 400 об/мин	540	70	332	336	86%	123	230
К. 8	3,7 kW при 400 об/мин	787	120	557	640	76%	368	670

Еще нагляднее влияние скорости показано на фиг. 290 для трехфазного короткозамкнутого двигателя фирмы Сименс-Шуккерт мощностью 11 kW (220V), где кривая *a* представляет влияние типа двигателя (по скорости) на к. п. д., кривая *b* — на $\cos \varphi$ и кривая *c* — стоимость в процентах, причем за 100 % принята цена типа на 1500 об/мин, наиболее дешевого. Итак, по цене и к. п. д. скорость 1500 об/мин является наивыгоднейшей для этой мощности двигателей фирмы Сименс-Шуккерт.

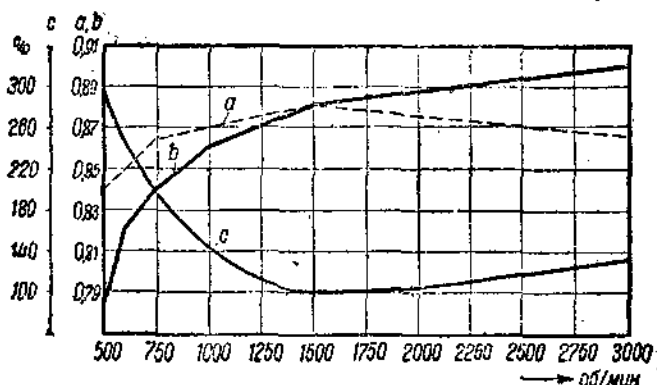


ТАБЛИЦА 30.

Горизонтальный тип

Мощность kW		1,47	2,20	2,95	4,05	5,15
Вес kg		92	95	98	150	155
Стоимость в рублях при синхронном числе об/мин	6 000	590	640	630	920	1 070
	4 500	613	670	712	960	1 100
Контроллер для пуска весом 13 kg руб.		112	112	112	112	112
Стоимость нормального коротко- замкнутого двигателя на 3000 синхронных об/мин.		140	160	192	230	—

Вертикальный тип на одну скорость

Мощность kW		1,47	2,20	2,95	4,05	5,15
Вес kg		100	105	110	165	170
Стоимость в рублях при синхронном числе об/мин	6 000	690	735	770	1 000	1 120
	4 500	715	760	795	1 050	1 160
Контроллер, руб.		116	116	116	116	116

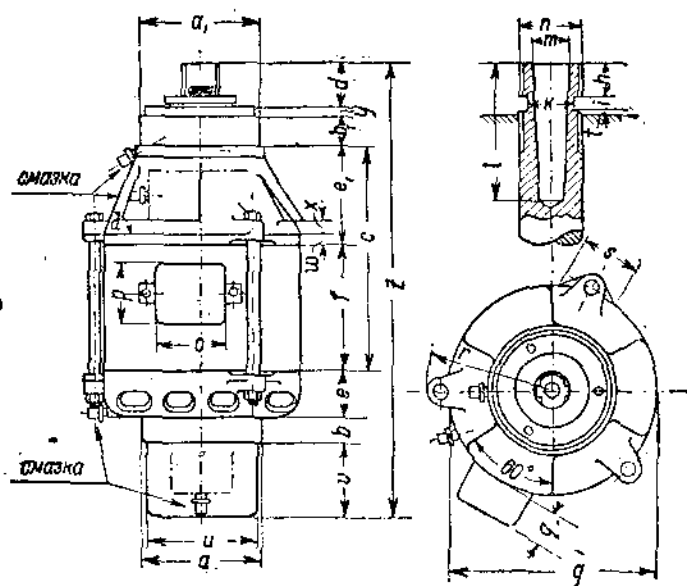
Вертикальный тип на две скорости

Мощность kW		1,47	2,20	2,95	4,05	5,15
Вес kg		103	108	113	168	175
Стоимость в рублях при синхронном числе об/мин	6 000/3 000	750	785	835	1 080	1 200
	4 500/1 500	775	830	865	1 120	1 240
Контроллер весом 15 kg, руб. . .		172	172	172	172	172

Модель	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m
Н 04	200	250	20	35	37,5	8	300	160	330	168	60	60
Н 84	270	320	25	42	44,5	10	360	190	391	183	80	75

Модель	a	a ₁	b	b ₁	c	d	e	e ₁	f	g	h	i	k	l
Н 08	170	170	35	50	384	46	66	138	180	300	25	10	39	110
Н 71	183	205	45	50	453	46	66	147	240	360	25	10	49	160

В заключение нельзя не остановиться на быстроходных двигателях трехфазного тока на 6000 синхронных об/мин при 50 пери-



Фиг. 291.

одах, выпущенных германской фирмой „Himmel-Werke“. *) Эти двигатели строятся специально для машин деревообрабатывающей

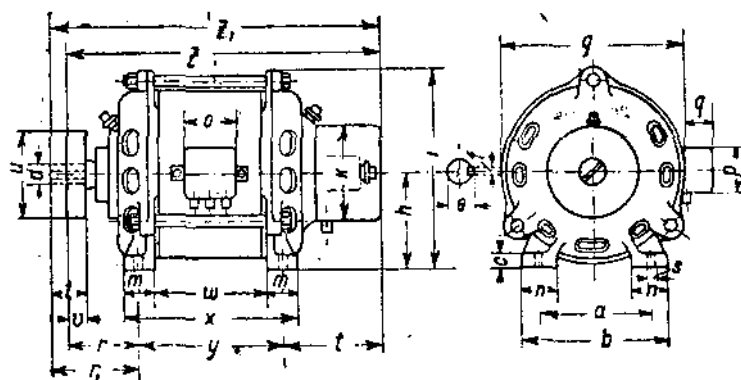
*) Описание и принцип действия двигателя см. главу IV, ч. I.

n	o	p	q	r	r_1	s	t	u	v	w	x	y	z	z_1
60 65	95 95	90 90	50 50	86 102	127 155	14 16	164 171	155 170	20 25	186 246	300 396	260 340	510 613	550 666

m	N_0	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	α
31,269 36,56	4 —	47,530 63,374	95 95	90 90	50 50	170 200	75 90	2 2	168 183	110 110	10 11	17 17	10 10	635 714	65° 73°

и металлообрабатывающей промышленности (фрезерные станки, сверлильные станки по дереву) и выполняются двух типов — вертикального и горизонтального (фиг. 291 и 292), исключительно с короткозамкнутым ротором. Для уменьшения потерь двигатели снабжаются шариковыми подшипниками. Двигатели могут быть приготовлены на 2 и 4 скорости переключением числа полюсов (6000/3000; 4500/1500 и 6000/4500/3000/1500).

Данные об этих двигателях приведены в табл. 50, 51 и 52. К сожалению, сведений о к. п. д. этих двигателей не имеется.



Фиг. 292.

Для возможности сравнения быстроходных двигателей с нормальными в табл. 50 (горизонтальный тип) дана стоимость нормальных короткозамкнутых двигателей на шариковых подшипниках той же фирмы (в 4 раза меньшая).

ТАБЛИЦА 53.
(Фиг. 293.)

Ф и р м а	Мощность	Тип	A	L	d	N	R	B	Вес kg	Цена в руб.	h	b	l
АСЕА	5/1400	—	740	80	33	8	7	8	136	280	35	25	10
ВКЭ	5/1260	HN-60	715	100	32	10	7	280	122	320	30	13	10
Вольта	5/1375	Г-6	593	65	25	8	5	235	128	310	35	20	8
Сименс-Шукерг	5/1300	9 M-65	624	87	33	10	7,5	250	17,2	290	32	10	13
Вестингауз	5/1325	WA-4	598	65	28	10	7	300	168	370	—	20	10

Остается еще один источник разнообразия выполнения двигателей, а именно: детали, имеющие, главным образом, вспомогательный характер, как, например, шкивы, салазки, щетки, шпонки и т. п. Между тем именно их разнотипность и причиняет наибольшее осложнение эксплуатации и служит причиной чрезмерного увеличения склада запасных частей, а следовательно мертвого капитала, вложенного в него. Так например, если (не говоря уже о разнотипности формы конца вала—цилиндрической, конической или с фланцем), обратиться к наиболее распространенной цилиндрической форме и притом для ременного привода, то в выполнении каждого завода она получает разные размеры для одной и той же мощности двигателя. То же относится и ко всем перечисленным выше деталям.

Весьма показательны в этом отношении нижеследующие таблицы, составленные по каталогам крупнейших заводов, а именно табл. 53 и фиг. 293, изображающие размеры конца вала для насадки шкива. Таблица составлена для двигателей постоянного тока мощностью 5 л. с. 1300 об/мин, табл. 54—для трехфазных асинхронных двигателей мощностью 3,7 kW при 1420 об/мин и табл. 55—для щеток.

Обозначения в таблицах соответствуют фиг. 293.

Разнообразие щеток, помимо размеров, увеличивается еще формой, обусловленной типом щеткодержателя (фиг. 294); кроме обычной прямоугольной, весьма распространены щетки прямоугольного сечения, но с закругленным верхом и трапециoidalной формы; наконец каждый размер изготавливается из различных сортов угля, чаще всего двух сортов—твердого и мягкого, в зависимости от типа двигателя, главным образом от его быстроходности.

Согласно стандарту Главэлектро СССР, щетки в зависимости от материалов, применяемых для их изготовления, подразделяются на следующие шесть марок:

- а) „У“ — угольные (твердые);
- б) „ПГ“ — полуграфитные (полутвердые);
- в) „Г“ — графитные (мягкие);
- г) „МГ“ — медно-графитные (мягкие);
- д) „МУ“ — медно-угольные (полутвердые);
- е) „М“ — металлические (V) (твердые).

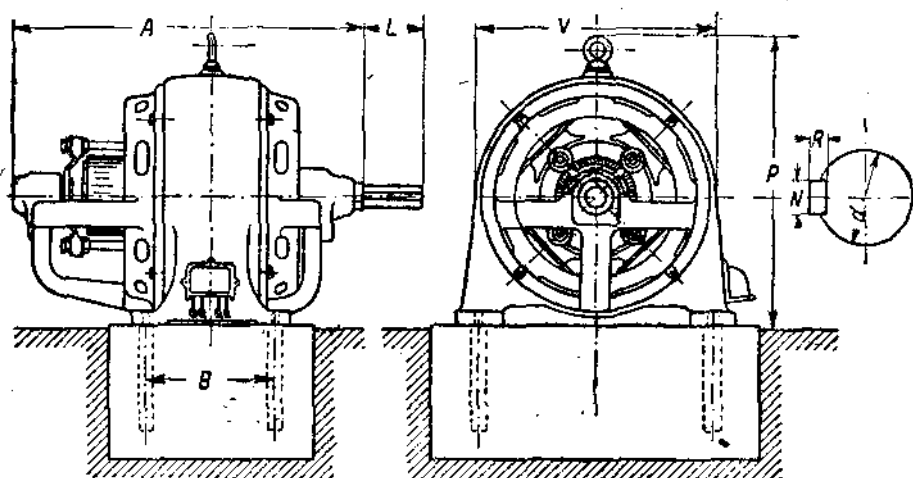
Примечание 1. В зависимости от типа щеткодержателя щетки изготавливаются: прямоугольные или фасонные, со специальной металлической арматурой, либо без нее.

Примечание 2. Щетки группы „У“ применяются для машин постоянного тока напряжением от 115 V и выше.

Щетки группы „ПГ“ применяются для машин постоянного и переменного тока напряжением от 115 до 500 V.

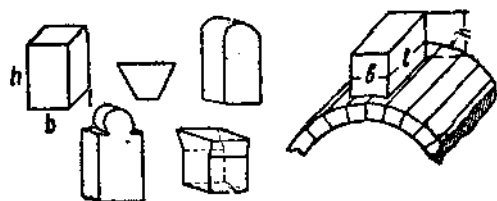
Щетки группы „Г“ применяются для быстроходных машин постоянного и переменного тока для турбогенераторов, быстро вращающихся умформеров, а также для машин переменного тока со стальными контактными кольцами.

Фирма	Мощность об/мин	Тип	A	L	d
АСЕА	5/1420 об/мин	M-4	706	80	33
ВКЭ	5/1430 об/мин	50/4	659	—	35
Вольта	5/1440 об/мин	M-354	670	75	25
Динамо	5/1420 об/мин	HT-5/1500	585	60	28
Сименс-Шуккерт	5/1430 об/мин	— 81,5	624	87	33
Вестингауз	5/1445 об/мин	AT/1500	680	72	32



Фиг. 293.

Щетки группы „МГ“ — для машин постоянного тока напряжением до 14 V, а также для быстроходных машин переменного тока с бронзовыми контактными кольцами.



Фиг. 294.

Щетки группы „МУ“ применяются для машин постоянного тока напряжением от 14 до 115 V, а также для машин переменного тока с бронзовыми и железными контактными кольцами.

Щетки группы „М“ применяются для машин переменного тока от 125 до 550 V, а также для низковольтных машин постоянного тока до 14 V.

Размеры электрощеток (в миллиметрах) приведены в табл. 55 и 56.

N	R	Расстояние между са- мками B	Вес в kg	К.п.д. в %	cos φ	Цена в рублях	Нормальный шкив	
							Диаметр	Ширина
8	8	300	114	85	0,85	250	150	100
10	7	240	116,4	—	—	245	150	100
8	5	220	122	87	0,89	218	150	90
10	7	212	101,8	—	—	245	160	100
10	7,5	230	98	85	0,85	195	140	110
—	—	310	136	85	0,86	315	150	100

ТАБЛИЦА 55.

(Фиг. 294.)

Размеры шетки марки „У“.

l	b	h			l	b	h		
13	8	30	—	—	30	30	30	—	—
13	10	35	—	—	32	10	30	50	60
13	15	35	—	—	82	13	50	—	—
13	20	35	—	—	32	16	50	—	—
15	5	35	—	—	32	20	50	—	—
15	6	40	—	—	32	22	50	—	—
16	7	50	—	—	32	25	50	—	—
18	7	35	—	—	32	28	60	—	—
18	10	35	50	—	35	16	60	—	—
18	13	35	—	—	35	18	60	—	—
18	15	50	—	—	40	10	50	—	—
18	20	50	—	—	40	12	60	—	—
20	6	30	45	—	40	13	50	60	—
20	8	45	—	—	40	16	50	60	—
20	10	30	—	—	40	18	50	—	—
25	10	35	—	—	45	12	60	—	—
25	15	30	—	—	45	16	60	—	—
30	7	45	50	—	50	10	50	—	—
30	10	50	—	—	50	13	50	—	—
30	12	50	—	—	50	16	50	—	—
30	13	50	—	—	60	10	50	—	—
30	14	40	50	—	60	13	50	—	—
30	16	50	—	—	60	16	50	—	—
30	18	45	—	—	65	10	50	—	—
30	20	50	—	—	65	13	50	—	—
30	25	50	—	—	65	16	50	—	—

Из рассмотрения этих таблиц ясно, что при оборудовании завода даже одноптиными двигателями, но различных фирм (а существую-

щие оборудования именно таковы по многим и вполне понятным причинам), приходится совершенно отбросить всякую надежду подыскать какую-либо взаимозаменяемую деталь. Более того, даже при простейшем ременном приводе, где в противоположность жесткому соединению муфтой не играют роли ни высота центра вала двигателя, ни диаметр его, — быстрая замена поврежденного двигателя подходящим другой фирмы оказывается невозможной, потому что размеры салазок, т. е. расстояние B между их осями, совершенно не унифицировано (от 212 до 310 мм в табл. 54).

ТАБЛИЦА 56.

(Фиг. 294.)

Фирма	Нормальный размер в мм			Фирма	Нормальный размер в мм		
	l	b	h		l	b	h
ВКЭ	8	16	28	Вольта	8	25	35
	10	13	30		10	20	35
	10	25	30		10	20	45
	32	10	50		12	20	45
	32	13	50				
	32	16	50				
АСЕА	7	10	30	Сименс-Шуккерт	6	5	10
	7	25	25		7	6	17
	10	25	25		9	6	26
	13	25	35		12	8	26
	16	25	35				
	13	32	36		13	7	32
	16	32	35		13	10	32
	19	32	35		13	15	32
Вестингауз	7	20	—		13	7	35
	11	20	—		13	10	35
	14	20	—		13	15	35
	17	20	—		13	20	35
	12	30	—				
	15	40	—		18	10	55
	12	43	—		18	15	55
	15	43	—		18	20	55
	19	43	—		18	25	55
	19	50	—				

Нельзя также произвести взаимную перестановку шкивов из-за различия размеров вала и шпонки (d , N , R — та же табл. 54).

Весьма характерным является еще то обстоятельство, что даже в буквенном обозначении размеров двигателей в каталогах нет ни одного хотя бы случайного совпадения, что весьма затрудняет

сравнение. Союз германских электриков обратил на это внимание и в февральском заседании 1924 г. предложил определенное жесткое приращение букв к размерам (Entwurf DIN. VDE, 2939).

§ 10. Общие основания для выбора типа двигателей.

Теперь, возвращаясь к установленному в начале главы основному положению при выборе типа двигателей, преследующему возможное упрощение и единообразие электрооборудования, мы видим, как тесно связан с ним вопрос о возможном упрощении самого производства двигателей путем нормализации, которая привлекает к себе все больше внимания со стороны и представителей производства и потребителей.

Не находя возможным в данном руководстве подробно останавливаться на этом вопросе чрезвычайно большого значения, выясним только, в каком направлении его разрешение представляется наиболее реальным и какое влияние оно может оказать на проектирование и эксплуатацию электропривода.

Несомненно, что нормализация деталей, а именно: болтов, шпонок, шкивов, щеток и т. л., может быть осуществлена проще, так как эти части имеют обширнейшее применение, сбыт их велик, и всегда, даже при нормировании, может быть обеспечена достаточная градация, чтобы экономичность производства деталей не могла отразиться на рациональности проектирования машин в целом.

Значительно сложнее обстоит дело с нормализацией самих двигателей прежде всего потому, что и внешние условия (сбыт) менее благоприятны, по крайней мере для крупных мощностей. Если можно уже говорить о массовом производстве малых и быстроходных двигателей, то для крупных и тихоходных до этого еще далеко.

Но и нормализация малых двигателей за границей встречает много препятствий. Начать с того, что существующие типы машин различных фирм складывались десятками лет, и конечно не приходится говорить о приведении всех своеобразно сложившихся производств к однотипному в широком, неограниченном масштабе.

Стандартизация может проводиться здесь лишь весьма осторожно, касаясь таких сторон производства, которые не могут стеснять техническое его совершенствование, иначе она своей жесткостью даст лишь отрицательные результаты. Поэтому проведение ее должно базироваться на самом тщательном и всестороннем учете интересов как потребителей, так и производства, чтобы заводы сами оказались заинтересованными в ней.

В последнем отношении на помощь приходит прогресс техники производства, достигающий пределов в использовании материалов, т. е. предельных минимальных размеров и веса машин, а параллельно с этим должны терять остроту и всякие особенности производства, по крайней мере обычного „рыночного“ рода и типа двигателей.

Действительно, за последнее время, в частности в Америке и Германии, замечается со стороны электротехнических

фирм некоторая склонность к взаимному соглашению на этот счет.

В СССР условия для нормировки особенно благоприятны вследствие централизации электротехнического производства, а также потому, что оно в значительной своей части еще организуется,

ТАБЛИ

Двигатели асинхронные трехфазные откры
(шкала мощностей, пределы

Номинальная мощность дви- гателей в		Синхронное число оборотов в минуту *)						Номинальное напряжение			
kW	л. с. прибл.							При рабочем соединении			
		В звезду Δ									
1,75	2,4	3 000	1 500	1 000	750			220	380		
2,85	3,9	3 000	1 500	1 000	750			220	380	500	
4,5	6,1	3 000	1 500	1 000	750			220	380	500	
6,8	9,3	3 000	1 500	1 000	750			220	380	500	
10	13,6	3 000	1 500	1 000	750			220	380	500	
14,5	19,7	3 000	1 500	1 000	750	600		220	380	500	
20,5	28	3 000	1 500	1 000	750	600	500	220	380	500	
29	39,5	3 000	1 500	1 000	750	600	500	220	380	500	
40	54,5	3 000	1 500	1 000	750	600	500	220	380	500	3 000
55	75	3 000	1 500	1 000	750	600	500	220	380	500	3 000
75	102	3 000	1 500	1 000	750	600	500	220	380	500	3 000
100	136	3 000	1 500	1 000	750	600	500	220	380	500	3 000
132	180	3 000	1 500	1 000	750	600	500	220	380	500	3 000 6 000
175	239	3 000	1 500	1 000	750	600	500		380	500	3 000 6 000
230	313	3 000	1 500	1 000	750	600	500		380	500	3 000 6 000
300	408	3 000	1 500	1 000	750	600	500			500	3 000 6 000

В 1928 г. Стандартным бюро Главэлектро были разработаны стандарты мощности, числа оборотов и напряжения трехфазных асинхронных открытых двигателей до 100 kW с короткозамкнутым ротором и до 300 kW—с фазным. Закрытые двигатели не стандартизированы (см. „Вестник стандартизации“, № 2, 1928 и табл. 57 и 58).

Каждой мощности присвоено определенное нормальное число оборотов, за исключением переходных мощностей к другому числу оборотов, где значение мощности повторяется во избежание больших ступеней момента вращения. Однако каждая модель нормального ряда может быть использована и для работы с другой скоростью при том же вращающем моменте, развивая при этом, конечно, другую мощность.

*) Типы, помещенные в таблице выше ступенчатой линии, исполняются без приспособления для подъема щеток и замыкания обмоток ротора накоротко.

Типы, помещенные в таблице ниже ступенчатой линии, исполняются с приспособлением для подъема щеток и замыкания обмоток ротора накоротко.

Нормальное напряжение 125 В (до 600 А), 220, 380 и 500 В; наибольший момент равен 2,5 момента соответствующей нормальной мощности при продолжительности включения $\alpha = 0,25$ (см. следующую главу); форма конца вала нормально цилиндрическая до 45 кВт, свыше — коническая. Междужелезное пространство также

ПА 57.

тые; ротор с контактными кольцами исполнения и основные данные).

статора в вольтах				Напряжение между контактными кольцами ротора в вольтах	Опрокидывающий мо- мент (максимальный вра- щающий момент) для дви- гателей с синхронным числом об/мин *)	
обмоток статора					3000	750
В треугольник Δ					1500	600
					1000	100
125	220			От 55 до 90		
125	220			" 70 " 115		
125	220	380		" 90 " 150	2,5	2,2
125	220	380	500	" 105 " 180	до	до
125	220	380	500	" 140 " 240	1,6	1,6
125	220	380	500	" 180 " 300		
125	220	380	500	" 190 " 350		
125	220	380	500	" 250 " 390		
125	220	380	500	" 140 " 175		
125	220	380	500	" 160 " 230		
125	220	380	500	" 195 " 290	2,5 до 1,8	
125	220	380	500	" 230 " 360		
125	220	380	500	Будет установлено дополнительно		
125	220	380	500			
125	220	380	500			

допускается не меньшим определенной нормы для тяжелых условий ударной и реверсивной работы (например краны).

Экономические последствия стандартизации, конечно, понятны, ибо она идет рука об руку с переходом на массовое производство. При правильной организации последнего стоимость продукта, в особенности массового сбыта, т. е. вспомогательных и запасных частей, понижается до таких размеров, когда единичная расценка ремонта оказывается выше стоимости новой сменной части массового изготовления.

*) Опрокидывающие моменты, приведенные в таблице, относятся к номинальному напряжению статора и к рабочему соединению его обмоток и указаны как кратные номинальных моментов двигателей.

Номинальный момент двигателя приблизительно принят при этом равным:

$$\frac{P}{n_s} = \frac{\text{номинальная мощность в Вт}}{\text{синхронное число об/мин}} \text{ kgm.}$$

Двигатели асинхронные, трехфазные от
(шкала мощностей, пределы)

Номинальная мощность двигателя в		Синхронное число оборотов в минуту						Номинальное напряже									
								При рабочем соедине									
kW	л. с. прибл.													В звезду Δ			
0,10	0,14	3 000	1 500	1 000					125	220							
0,25	0,34	3 000	1 500	1 000					125	220							
0,52	0,70	3 000	1 500	1 000					125	220							
1,0	1,35	3 000	1 500	1 000	750				125	220							
1,75	2,4	3 000	1 500	1 000	750					220	380						
2,85	3,9	3 000	1 500	1 000	750					220	380	500					
4,5	6,1	3 000	1 500	1 000	750					220	380	500					
6,8	9,3	3 000	1 500	1 000	750					220	380	500					
10,0	13,6	3 000	1 500	1 000	750					220	380	500					
14,5	19,7	3 000	1 500	1 009	750	600				220	380	500					
20,5	28,0	3 000	1 500	1 000	750	600	500			260	380	500					
29,0	39,5	3 000	1 500	1 000	750	600	500			220	380	500					
40,0	54,5	3 000	1 500	1 000	750	600	500			220	380	500					
55	75	3 000	1 600	1 000	750	600	500			220	380	500					
75	102	3 000	1 500	1 000	750	600	500			220	380	500					
100	136	3 000	1 500	1 000	750	600	500			220	380	500					

Очевидные выгоды этого для эксплуатации усугубляются тем, что такие нормированные части становятся взаимно заменимыми у одностипных двигателей.

Остается сказать несколько слов об условиях выбора типа двигателей в рамках поставленного руководящего положения — возможного единообразия оборудования.

Надо заметить, что в некотором противоречии с этим требованием стоит другое, выясняемое в главе VIII, требование минимума промежуточных передач от двигателя к производственной машине (станку), которое при разнообразии этих последних, в частности в отношении скорости вращения, ведет к разнотипности двигателей. Таким разнообразием станков отличается в русских условиях главным образом металлообрабатывающая промышленность.

Однако это противоречие разрешается, во-первых, естественной тенденцией к построению быстроходных машин-орудий с целью наилучшего использования материала; во-вторых, всякая промышленность в своей непрерывной и безостановочной дифференциации стремится к сосредоточению под общей крышей по возможности только однотипного производства.

Наконец, и при электрификации таких механизмов, которые требуют нарушения основных принципов единообразной системы, выход, конечно, существует. Он не может быть формулирован в виде „правил“, но легко может быть найден здравым смыслом: если

крытые; ротор короткозамкнутый
исполнения и основные данные).

напряжения статора в вольтах				Пусковой ток статора для двигателя с синхронным числом оборотов в минуту *)		Пусковой момент **)	Опрокидывающий момент (максимальный вращающий момент) для двигателей с синхронным числом оборотов в минуту ***)	
число обмоток статора							3000	750
В треугольник Δ				3000	750		3000	750
				1500	600		1500	600
				100	500		1000	500
125								
125								
125				6,5	5,5	2,0		
125								
125	220						2,5	2,2
125	220					1,7	до	до
125	220	380					1,6	1,6
125	220	380	500	7,0	6,0			
125	220	380	500			1,3		
125	220	380	500					
125	220	380	500					
125	220	380	500					2,5
125	220	380	500	8,0	6,5	1,0	до	
125	220	380	500				1,8	
125	220	380	500					
125	220	380	500					

применение нетипового двигателя, например тихоходного или закрытого с искусственным охлаждением, диктуется соображениями производства, не допускающего громоздких передач к быстроходному двигателю, пыльного или опасного в отношении взрыва, то такое исключение рационально, а если оно проводится для целого ряда приводов, то перестает быть исключением.

Если некоторые станки конструируются ныне как одно целое с электродвигателем, и последний получает иногда совершенно своеобразное и, конечно, ненормальное выполнение, и если эта кон-

*) Пусковые токи статора, приведенные в таблице, относятся к номинальному напряжению статора и к рабочему соединению его обмоток и указаны как кратные номинальных токов двигателей.

**) Пусковые моменты, приведенные в таблице, относятся к номинальному напряжению статора и рабочему соединению его обмоток и указаны как кратные номинальных моментов двигателей.

Номинальный момент двигателя приближенно принят при этом равным:

$$\frac{P}{n_s} = \frac{\text{номинальная мощность в W}}{\text{синхронное число об/мин}} \text{ kgm.}$$

***) Опрокидывающие моменты, приведенные в таблице, относятся к номинальному напряжению статора и к рабочему соединению его обмоток и указаны как кратные номинальных моментов двигателей.

струкция рациональна, она тем не менее становится массовой, а применение большого числа таких „станков-двигателей“ не может внести в эксплуатацию нежелательную пестроту электрического оборудования.

Жизненность специальных конструкций станины для укрепления на станках подтверждается тем, что формы выполнения их по DIN, VDE 2950 перенесены уже в каталоги электротехнических фирм, например формы В 5, В 9, В 10, В 11, В 12, В 13, V 1, V 3, V 5, V 6, V 8, V 9, V 10, V 11, V 12 и V 13 (Siemens-Schuckert Preisliste, M. H., Matz, 1928, 8—9), (см. выше фиг. 264).

Таким же примером может служить указанная нормировка особого выполнения закрытых крановых двигателей трехфазного тока для прерывистой работы с продолжительностью включения $\alpha = 0,25$.

В заключение, однако, надо подчеркнуть, что предлагаемое к руководству при выборе типа двигателя основное положение (возможное единобразие электрического оборудования) должно быть в полном соответствии с главной руководящей линией проектирования электромоторного привода — наибольшей экономичностью и надежностью оборудования и его наибольшей приспособленностью к условиям производства.

Как уже неоднократно было констатирувано, принятая система электрификации в целом может считаться правильной, если она удовлетворяет условию экономичности в отношении стоимости электрического оборудования и его эксплуатации и если она в наивысшей мере способствует увеличению производительности электрифицируемого предприятия. К этому мы вернемся в главе VIII, но из вышеизложенного уже достаточно ясно, что такое соответствие частного руководящего положения с общим основным обеспечивается в отношении экономичности уменьшением складов запасных частей, а также удешевлением стоимости последних при стандартизации, а в отношении надежности — возможностью предупредить всякие перерывы в работе быстрой заменой однотипных частей при аварии, хотя бы взятых с соседнего резервного станка.

Последнему условию, помимо целесообразного проектирования, должна способствовать правильная постановка эксплуатации электротехнического цеха, которая начинает привлекать все большее внимание, в особенности в Америке.

Действительно, в крупных фабрично-заводских предприятиях с сотнями и тысячами двигателей самых разнообразных мощностей и с разнохарактерностью самого производства трудно, конечно, избежать некоторой разнотипности даже при планомерном проектировании. Что же касается существующего оборудования большинства крупных русских фабрично-заводских предприятий, то исторически понятная пестрота оборудования не только в отношении типов, но и рода двигателей, т. е. системы тока, доходит до поражающих размеров и заслуживает самого серьезного внимания. Здесь только планомерная систематизация и регистрация всего электрического оборудования могут помочь быстро ориентироваться в резервных единицах в случае аварии.

Примером такой регистрации может служить карточная система, сильно распространившаяся на американских заводах. Для иллю-

страции приведем здесь принятую на Американском судостроительном заводе (The American Ship Building C-пу Lorain).

Каждый двигатель, поступающий на завод, получает свой местный номер, который обозначается на двигателе, и кроме того свою личную карточку (паспорт), где записываются его номер и все необходимые данные (табл. 59).

Особенно существенна последняя графа, где указываются все номера тождественных двигателей, что способствует быстрой ориентировке при аварии их.

Такой же местный номер и свою карточку получает якорь двигателя (табл. 60). На обороте карточки заносится весь „послужной список“ данного двигателя или якоря.

ТАБЛИЦА 59.

Электрический цех			
Мотор № 76			
Приводит в движение:	Горизонт. пресс.	Местоположение:	Котельная
Фирма Вестингауз	Тип „5“	Шунтовой Последов. Компаунд	Открытый Полузакрытый Закрытый
Гарант. мощность: HP 7 $\frac{1}{2}$. Гарант. обороты 975. Действ. обороты 1075.			
Ящик № 3			
Щетки			
№ 4.	Ширина 1 $\frac{1}{2}$ "	Толщина 3/8"	Длина 2 $\frac{1}{4}$ "
Последовательные катушки		Шунтовые катушки	
Вес проволоки:			
Размер: № 21/0285			
№ 7/144° 17—1 $\frac{1}{2}$			
Число витков: 2400. Общее число витков:			
Число слоев:			
Примечание касательно обмотки			
Журнал 2	Кат. № 5	Шкив № 30602	
№ тождественных моторов: 18—19—25—32—33—34—38—39—40—44— —45—72—73—76			
Примечание.			
Обозначения, не соответствующие данному мотору, зачеркиваются.			

Так, например, из пометок на обратной стороне якорной карточки:

Двигатель 32 19/III—10

Ремонт 673 7/VII—12

Двигатель 76 12/X—12

видно, что данный якорь № 566544 работал в двигателе № 32 с 19 марта 1910 г. по 7 июля 1912 г., когда был сдан в ремонт по специальной ремонтной карточке № 673 (см. табл. 61) и поставлен 12 октября 1912 г. в другой двигатель № 76.

ТАБЛИЦА 60.

Электрический цех	
Якорь № 566544	
Фирмы: <i>Вестингауз</i>	Тип: — 3
Число сл.: $7\frac{1}{2}$. Обороты: 975	Действит. обороты: 1075
Диаграмма обмотки № 10	Лист размеров: № 52
Обмотка { петлевая волновая	
Число пазов: 49	Число катушек в пазу: 2
Число проводов в катушке: 8	Число витков в катушке: 2
Размер проволоки . . .	№15/0571
Полный вес провода	
Шаг обмотки: 1 — 12. Форма катушки: 32 А — В	
Кат. № 33028	
Примечания	
В а л	
Вал со стороны коллектора $1\frac{3}{4}$ ". Вал со стороны шкива	
Диаметр подшипника: $1\frac{5}{8}$ "	
Диаметр шкива: $1\frac{5}{8}$ "	
Паз для шпонки: $\frac{3}{8}$ " $\times$ $1\frac{1}{8}$ "	
К о л л е к т о р .	
Число сегментов 97. Длина 2". Ширина $3\frac{1}{16}$ "	
Этот якорь подходит к двигателям: № 18, 19, 25, 32, 33, 34, 38, 39, 40, 44, 45, 48, 72, 73, 74, 76	
Примечания	

Эта карточка сопровождает свою часть в ремонт, и пометки, даваемые на ней, определяют стоимость ремонта.

Наконец реостаты также имеют карточки особого цвета.

ВКЭ на основании американских образцов выработала несколько упрощенную систему карточки, общую для статора и ротора

ТАБЛИЦА 61.

				Электрический цех	
Ремонтная карточка № 673				Число 30/VII — 12	
Описание аппарата: <i>Намотка якоря № 566544</i>					
<i>S — 3. 7 1/2 HP.</i>					
Взятого из мотора № 32 из пресса № 2					
Кем: <i>Вигандом</i>					
Причина аварии: <i>Короткое замыкание на коллекторе</i>					
<i>4 катушки сгорели</i>					
Подробности работы: <i>Поставлены 4 новые катушки и 20 коллекторных сегментов, выпрямлен вал, произолировано лентой</i>					
Работа			Число и вес	Материал	
Число	№ рабочего	Часы			
8 — 3	262	4	4	<i>Катушки Лента Припой 0,32 лист. миканита Картон 0,25 Кусков меди</i>	
8 — 7	124	2	1 1/2 кат.		
8 — 8	124	4	1 1/2 ф.		
8 — 12	84	10	1 "		
8 — 13	57	2	2 "		
8 — 13	84	10	20 "		
8 — 13	52	3	—		
Стоимость работы:		Стоимость материала:		Полная стоимость:	
9,78 доллара		2,76 доллара		12,54 доллара	
Ремонт окончен 14/VIII					
Пушен в ход: 12/X — 12 в моторе № 76					
Мастер					

(табл.62), причем оборотная сторона ее служит как ремонтная (табл.63). Карточки имеют несколько цветов, если на заводе применена смешанная система тока или напряжения и если они должны быть распределены в электротехническом цеху по ящикам. Число по-

ТАБЛИЦА 62.

Название предприятия *)		Отдел завода	
Заводской номер		Мотор №	Поступил 19 . г.
Заводской тип		По заказу №	
Приводит в движение		{ Открытый **) { Закрытый { Асинхронный: короткозамкнутый с кольцами { Компаунд { Шунтовой { Последовательный	
Фирма	Обороты		
Мощность	Ток		
Напряжение	Изоляция		
Реостат №	Тип		
Пусковой трансформатор №			
Рубильник №			
Контроллер №			
Сопротивление №			
Статор, магниты			
Соединение:		Размер проволоки голой	
Число фаз		" " изолированной	
" полюсов		Схема обмотки: книга № . . . , стр.	
" катушек		Тип обмотки	
" витков в катушке			
Ротор, якорь			
Соединение:		Размер проволоки голой	
Число фаз		" " изолированной	
" полюсов		Схема обмотки: книга № . . . , стр. . .	
" витков в катушке		Тип обмотки	
Междужелезное пространство			
Щетки			
Число		Тип и фирма	
Угольные, медные		Длина	Ширина Толщина
Номера таких же моторов			
Номера таких же якорей			

*) Вписывается.

**) Обозначения, не соответствующие данному двигателю, зачеркиваются.

ТАБЛИЦА 63.

Название предприятия				
Двигатель №				
Число	Проверка двигателя		Авария..... вероятная причина.....	Ремонт и проверка <i>Примечания</i>
	Состояние изоляции	Междужел. пространство		

следних соответствует числу цехов завода или отделов предприятия, или числу шахт и т. д.

Кроме ящиков для двигателей, находящихся в работе, имеются ящики ремонта и резерва. При перемещении двигателя из одного цеха в другой его карточка переносится в соответствующий ящик. Система, несомненно, упрощенная, но имеющая и недостаток— в случае указанного выше разделения ротора от статора.

ГЛАВА VI.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ В ОТНОШЕНИИ НАГРЕВА.

§ 1. Общие основания.

Обратимся теперь к решению весьма существенного вопроса — выяснению общих оснований для правильного выбора электродвигателей по мощности в том отношении, чтобы по окончании цикла работы (например одной смены) выбранный двигатель оказался нагретым в соответствии с нормами, т. е. не выше их, что недопустимо, и по возможности не ниже, что неэкономично в смысле стоимости двигателя и его к. п. д. Вместе с тем и в течение самого процесса работы двигатель по возможности не должен иметь даже мгновенных подъемов температуры сверх нормы.

Насколько просто вопрос этот решается при выборе двигателя для ровной и непрерывной нагрузки, настолько же в случае неравной и прерывистой работы он оказывается сложным и многосторонним по совокупности влияния на его решение, с одной стороны, диаграммы нагрузки, а с другой — тепловых свойств самого двигателя. Последние в свою очередь связаны самым тесным образом, как увидим далее, и с родом двигателя по роду тока, и с типом — по характеру защиты от окружающей среды и по способу вентиляции, и, наконец, с самой величиной двигателя.

Затем выбранный по нагреванию двигатель должен быть проверен в отношении механических свойств, т. е. будет ли он в состоянии развить необходимый пусковой момент, в определенное число раз обычно превышающий нормальный, и преодолеть встречающиеся по нагрузочной диаграмме случайные или периодические кратковременные пики, т. е. максимумы моментов сопротивления.

Итак, обратимся к решению первой из поставленных задач — выбору двигателя по мощности с точки зрения его нагревания, ограничиваемого нормами в зависимости от класса изоляции двигателя O , A и B температурой 45° , 60° и 80° сверх температуры окружающей среды, принимаемой в $35^\circ C$.

Это нагревание не должно быть превзойдено при работе двигателя, различающейся по нормам на:

а) повторно-кратковременную работу (краны, подъемные механизмы, железные дороги);

б) кратковременную работу;

в) продолжительную работу, при которой двигатель успевает достичь установившейся температуры.

При этом под нормальной мощностью двигателей и трансформаторов понимается:

а) при повторно-кратковременной работе — такая мощность, при которой двигатель может работать длительно при условии регулярного чередования рабочих периодов с промежутками (паузами),

при заданном режиме $\epsilon = \frac{t_a}{t_a + t_0} = \frac{t_a}{t_s}$, где t_a — продолжительность периода работы, t_0 — продолжительность периода паузы, $t_s = t_a + t_0$ — продолжительность одного цикла;

б) при кратковременной работе — такая мощность, которую двигатель может развивать в течение требуемого промежутка времени, не перегреваясь;

в) при продолжительной работе — такая, которую двигатель может развивать в течение произвольно долгого промежутка времени без перегрева. Кроме этих терминов, принят еще термин наибольшей или мгновенной мощности, которую двигатели должны выдерживать в течение 2 минут. Термин этот, однако, имеет специальное назначение — характеризовать способность двигателя к перегрузке.

В дальнейшем остановимся подробнее на этих понятиях, также на возможности пересчета мощности при одном режиме в соответствующую при всяком другом, равно как и вообще на соотношении между длительной и кратковременной мощностью, весьма сложном вследствие многостороннего влияния на него индивидуальных свойств различных двигателей. Отметим здесь еще, что так как область прерывистой работы довольно широка, заводы в целях удешевления двигателей, специально предназначенных для нее (например крановых), нередко допускают некоторые особенности в проектировании. Нормами предусматривается и разница в свойствах таких специальных двигателей: так, двигатели для продолжительной работы должны развивать момент не менее $1,6 M_{ном}$, а двигатели для прерывистой работы, — $3 M_{ном}$; по английским нормам двигатели для длительной работы должны развивать наибольшую, или перегрузочную, мощность, в $1\frac{1}{2}$ раза превышающую длительную мощность, — в течение $\frac{1}{4}$ минуты, а двигатели для прерывистой работы — двойную мощность в течение $\frac{1}{2}$ минуты.

В виду сугубой важности вопроса о выборе мощности по нагреванию разберем его возможно тщательнее как с теоретической точки зрения, так и с практической, причем в последнем отношении не будем считать излишней некоторую подробность перечисления предложенных способов.

Нагревание двигателя обуславливается теплом, развивающимся в нем при работе, которое в свою очередь определяется потерями. Последние разделяются на:

а) потери на трение (о воздух и в подшипниках);

б) потери в железе (гистерезис и токи Фуко);

в) потери в меди (омические или джоулевы).

Законы их известны: потери первых двух категорий зависят от числа оборотов n и непосредственно не зависят от тока, а потому часто называются постоянными, что, конечно, не совсем справедливо; потери же последней категории (омические) пропорциональны квадрату силы тока и называются переменными. Отно-

шение их $\alpha = \frac{k}{v}$ было уже введено и названо коэффициентом потерь.

Отсюда следует, что все потери будут постоянными, если число оборотов и сила тока постоянны. Явление это имеет место для ровной непрерывной работы (трансмиссионный привод большой группы станков), но не имеет места ни для кратковременной, ни для прерывистой работы.

В двух последних случаях приходится подсчитывать потери в зависимости от n и i , а затем строить их в виде диаграммы в зависимости от времени t и на основании ее находить нагревание двигателя.

Рассчитанные таким образом температурные кривые, естественно, укажут и колебания температуры соответственно колебаниям n и i . Наивысшая температура не должна быть больше предписываемой нормами. Однако расчет и нахождение температур из потерь представляет значительные трудности, несмотря на принятые упрощения, а именно на применение так называемого принципа наложения при расчете конечной температуры, т. е. наложения ряда отдельных температур, получающихся из учета сначала: а) только потерь на трение, затем б) только потерь в железе и, наконец, в) только потерь в меди. Таким образом конечная температура получается путем суммирования действия всех потерь, имеющих место в различных частях электрического двигателя, что не вполне точно для изучения изменения температуры в функции времени t , но достаточно для подсчета конечной температуры. Этот, несомненно, трудный способ не может претендовать в то же время на большую точность, ибо базируется на таких мало изученных для электродвигателя величинах, как теплоемкость и теплопроводность его как одного целого.

§ 2. Процесс нагревания и охлаждения.

Прежде всего рассмотрим процесс нагревания электродвигателя в самом общем виде. Пусть

W — то количество тепла в ватт-секундах или джоулях ($1 \text{ kW} \cdot \text{sec} = 0,24 \text{ cal}$), которое вследствие потерь будет каждую секунду развиваться в двигателе или в части его; величина в общем случае переменной нагрузки, конечно, переменная;

c_0 — удельная теплоемкость, различная для различных материалов двигателя $\left(\frac{\text{cal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \text{ или } \frac{W \cdot \text{sec}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} = \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$;

μ — тепло, отдаваемое в 1 сек с 1 m^2 какой-либо поверхности охлаждения двигателя при нагреве на 1°C $\left(\frac{W}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$;

величина опять-таки переменная для различных частей, в особенности вращающихся; по Бланку (ETZ 1922):

$$\mu = \mu_0 (1 + \zeta \cdot n), \quad (266)$$

где $\mu_0 = 12 \frac{W}{m^2 \cdot 1^\circ C}$, а ζ — коэффициент, учитывающий влияние числа оборотов.

По Фишер-Хиннену для тяговых двигателей:

$$\mu = \mu_0 (1 + \beta \sqrt{v}), \quad (266')$$

где v — относительная скорость перемещения m/sec , а β — некоторый коэффициент, значения которого указаны в табл. 64.

ТАБЛИЦА 64.

Удельная потеря теплоты $\frac{W \cdot sec}{sec \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$	Коэффициент λ	Удельная теплоемкость c_0
Для закрытых электродвигателей (внешн. поверхн.) $\mu_0 = 10$	$\lambda = 0$	Для меди — $390 \frac{W \cdot sec}{kg \cdot ^\circ C} = 0,094 \frac{cal}{kg \cdot ^\circ C}$
„ движущихся магнитных катушек $\mu_0 = 20$	$\lambda = 0,5$	„ железа — $480 \frac{W \cdot sec}{kg \cdot ^\circ C}$
„ ротора $\mu_0 = 25$	$\lambda = 0,8$	„ изолирующих материа-
„ статора $\mu_0 = 40$	$\lambda = 0$	лов — $1200 - 2500 \frac{W \cdot sec}{kg \cdot ^\circ C}$
„ коллектора $\mu = 60 - 80$	$\lambda = 0,8$	

Пусть:

F — поверхность (m^2), отдающая тепло;

τ_n — температура, соответствующая тепловому равновесию в $^\circ C$, исчисляемая, в видах удобства пользования нормами, не от $0^\circ C$, а от температуры окружающей среды, т. е. под τ будет пониматься далее не температура, а превышение ее над температурой окружающей среды.

t — время (sec).

Когда через весьма продолжительное время будет достигнуто тепловое равновесие при температуре τ_n , то все тепло, развиваемое в двигателе в 1 sec и выражаемое в ваттах, будет отдаваться в окружающую среду:

$$W = \Sigma (\mu \cdot F) \cdot \tau_n, \quad (267')$$

где под $\Sigma \mu F$ понимается сумма поверхностей различных частей двигателя, как вращающихся, так и неподвижных.

В элемент времени dt :

$$W dt = \Sigma \mu F \cdot \tau_n \cdot dt \quad W \cdot sec \text{ или } cal. \quad (267'')$$

С другой стороны, полное количество тепла, содержащееся в различных частях двигателя при температуре τ_n , можно выразить, если через G обозначить вес:

$$K = \sum (c_0 \cdot G) \tau_n.$$

В виду чрезвычайной сложности вычислений при неоднородности условий теплоотдачи и теплоемкости различных частей двигателя — для упрощения в некоторых случаях будем принимать двигатель как гомогенное тело. При этом выражение $\sum \mu F$, т. е. среднюю потерю тепла на 1°C для всего двигателя в целом, будем обозначать буквой A и называть теплоотдачей двигателя (немецкое „die Wärmeabgabefähigkeit“, английское „the heat emission capacity“), а выражение $\sum c_0 G$ — теплоемкостью двигателя („die Wärmeaufspeicherungsfähigkeit“, „the heat absorption capacity“ или „the caloriceptivity“).

Таким образом для отдаваемого в 1 секунду тепла при установившемся тепловом состоянии имеем:

$$W = A \cdot \tau_n, \quad (267)$$

а для теплосодержания двигателя:

$$K = C \cdot \tau_n. \quad (268)$$

Обозначая через T такое время в секундах, в течение которого температура двигателя достигла бы установившейся величины при чисто теоретическом условии отсутствия отдачи тепла в окружающую среду, получаем новое выражение для теплосодержания K тела к моменту окончания T секунд, если в 1 секунду в двигателе развивается W ватт тепла:

$$K = W \cdot T. \quad (269)$$

Приравнивая уравнения (268) к (269), имеем, вводя уравнение (267):

$$T = \frac{C \cdot \tau_n}{W} = \frac{C \cdot \tau_n}{A \cdot \tau_n} = \frac{C}{A} \quad (270)$$

Эта величина T , имеющая размерность времени

$$\left(\frac{W \cdot \text{sec}}{1^\circ\text{C}} : \frac{W}{1^\circ\text{C}} = \text{sec} \right)$$

и обозначающая, как сказано, время, в течение которого двигатель достиг бы температуры τ_n при отсутствии отдачи тепла, имеет весьма важное значение и носит название постоянной времени нагревания („die Wärmezeitkonstante“, „the time-constant“).

Представим теперь уравнение теплового равновесия в дифференциальном виде для переменных условий работы.

Из предыдущего ясно, а кривая нагрева (фиг. 295) подтверждает, что развивающееся в двигателе тепло будет распределяться двумя путями: в начале нагревания, когда приращение температуры $d\tau$ двигателя невелико, главная часть тепла ($C d\tau$) пойдет, так сказать,

„во-внутрь“ двигателя, т. е. на нагрев его материалов; рассеиваться же „во-вне“ будет ничтожное количество $A\tau dt$ в виду ничтожности теплового напора τ .

По мере повышения сверхтемпературы *) τ эта вторая часть $A\tau dt$ начнет увеличиваться и, наконец, достигнет такой величины, когда по ур-нию (267) все тепло $W = A\tau_*$ будет излучаться „во-вне“. При этом приращение температуры $d\tau$ прекратится, а вместе с этим и поток тепла „во-внутрь“ ($Cd\tau$). Согласно ур-нию (267), установившаяся температура $\tau_* = \frac{W}{A}$ не зависит от теплоемкости двигателя C .

Вообще же говоря, к моменту времени t , когда температура $\tau < \tau_*$, будут существовать оба потока тепла, и для элемента времени dt можно написать уравнение распределения тепла:

$$Wdt = Cd\tau + A\tau dt \quad (271)$$

Отсюда видно, что в самом начале нагрева, когда сверхтемпература τ_0 равна нулю, рост ее во времени $\frac{d\tau_0}{dt_0}$, характеризу-

емый углом между касательной к кривой нагрева в начальной точке и осью времени, определит теплоемкость двигателя $C = W \frac{dt}{d\tau}$ при определенной величине тепла W .

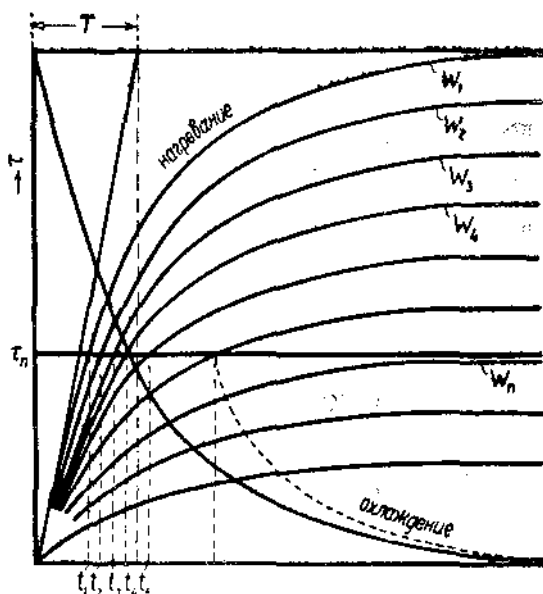
Как уже говорилось, теплоемкость двигателя C и его теплоотдача A , строго говоря, не постоянны, а зависят от температуры двигателя, скорости вращения его ротора и температуры окружающей среды.

Таким образом в основном дифференциальном уравнении (271) теплового баланса коэффициенты W , C и A являются в данном общем случае некоторыми функциями времени t , как и переменная τ .

- Произведем интегрирование уравнения (271) для этого общего случая.

Деля обе части уравнения на $A dt$, получим:

$$\frac{W}{A} = \frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \tau$$



Фиг. 295.

*) Разность температур какой-нибудь части двигателя и окружающей среды.

или

$$\tau_n = T \frac{d\tau}{dt} + \tau, \quad (272)$$

где $\tau_n = \frac{W}{A}$ и $T = \frac{C}{A}$ — функции времени t .

Предварительно определим общий интеграл этого уравнения без свободного члена:

$$T \frac{d\tau}{dt} + \tau = 0.$$

Разделяя переменные этого уравнения $\frac{d\tau}{\tau} = -\frac{dt}{T}$ и интегрируя, находим:

$$\ln \tau = -\int \frac{dt}{T} + k_1$$

или

$$\tau = e^{-\int \frac{dt}{T} + k_1}. \quad (273)$$

Считая k_1 не произвольной постоянной интегрирования, а некоторой функцией времени t , найдем для нее такое выражение, при котором ур-ние (273) было бы интегралом ур-ния (272).

Дифференцируя ур-ние (273), получаем:

$$\frac{d\tau}{dt} = e^{-\int \frac{dt}{T} + k_1} \left(-\frac{1}{T} + \frac{dk_1}{dt} \right). \quad (273')$$

Подставляя значения τ и $\frac{d\tau}{dt}$ из ур-ния (273) и (273') в ур-ние (272), находим:

$$\tau_n = \frac{dk_1}{dt} T e^{-\int \frac{dt}{T} + k_1}$$

или

$$e^{k_1} dk_1 = \frac{\tau_n}{T} e^{\int \frac{dt}{T}} \cdot dt.$$

Интегрируя это уравнение, получаем:

$$e^{k_1} = \int \frac{\tau_n}{T} e^{\int \frac{dt}{T}} \cdot dt + k_2$$

или

$$k_1 = \ln \left(\int \frac{\tau_n}{T} e^{\int \frac{dt}{T}} \cdot dt + k_2 \right),$$

где k_2 — произвольная постоянная интегрирования.

Подставив найденное значение k_1 в ур-ние (273), получим общий интеграл уравнения:

$$\tau = e^{-\int \frac{dt}{T} + \ln \left(\int \frac{\tau_n}{T} e^{\int \frac{dt}{T}} dt + K_2 \right)}$$

$$\tau = \left(\int \frac{\tau_n}{T} e^{\int \frac{dt}{T}} dt + k_2 \right) e^{-\int \frac{dt}{T}} \quad (274)$$

Произвольная постоянная интегрирования k_2 может быть найдена из условия относительно значения τ при начальном значении t .

Предполагая величину T постоянной, получим уравнение (274) в виде:

$$\tau \cdot e^{\frac{t}{T}} = \frac{\tau_n}{T} T \cdot e^{\frac{t}{T}} + k_2.$$

Произвольная постоянная k_2 определяется в данном случае из начального условия температуры τ_0 при $t'=0$, т. е.

$$\tau_0 = \tau_n + k_2 \quad \text{или} \quad k_2 = \tau_0 - \tau_n$$

и окончательно

$$\tau \cdot e^{\frac{t}{T}} = \tau_0 - \tau_n + \tau_n e^{\frac{t}{T}}$$

или

$$\tau = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (275)$$

Ур-ние (274) в общем виде может быть применено к расчету нагрева двигателя с различной степенью точности:

1) По методу G. E. Luke*) сначала определяется превышение температуры железа ротора или статора над температурой окружающей среды, а затем превышение температуры их обмоток над температурой соприкасающегося с ними железа. Способ, как видно, чрезвычайно сложный и в практике фабрично-заводских электрических приводов не применяемый.

2) Для упрощения, как уже сказано, можно принимать двигатель как гомогенное тело и развивающееся в нем тепло рассчитывать по величине полных потерь в двигателе.

3) Наконец в дальнейшем упрощении**) можно учитывать тепло W только по Джаулевым потерям, пренебрегая постоянными потерями; тогда

$$W = i^2 R;$$

$$\tau_n = \frac{W}{A} = \frac{i^2 R}{A} = \frac{i^2}{A'},$$

где

$$A' = \frac{A}{R}.$$

Однако и эти упрощения не делают метод настолько простым, чтобы применение его оправдалось в индивидуальных случаях

*) J. of A. J. E. E., 1922, стр. 165.

**) См. проф. Шевалин, проф. Лебедев, журнал „Электричество“, 1923 и 1924.

крайне разнообразных фабрично-заводских приводов. Указанные авторы и рекомендуют его для выбора мощности тяговых двигателей, где одним подсчетом определяется мощность сотен двигателей, выполняющих работу одного и того же режима. Насколько подсчеты осложняются при переменных нагрузке и скорости, можно видеть из того, что для каждого участка диаграммы нагрузки необходимо подсчитать соответственные величины A и T , нужные для расчетов (см. далее табл. 66).

Уравнение однако чрезвычайно упрощается, если принять нагрузку двигателя постоянной. В таком случае при постоянной скорости μ и A будут также постоянны для данного двигателя. Следовательно, при постоянной величине C будет постоянна и величина T , а ур-ние (274) примет вид ур-ния (275).

Нетрудно доказать, что второй член $\tau \cdot e^{-\frac{t}{T}}$ общего ур-ния (275) представляет собой закон охлаждения.

Действительно, при отключении двигателя от сети, когда выделяемое тепло $W=0$, уравнение распределения тепла примет вид:

$$0 = C d\tau + A \tau dt \text{ или } dt = -\frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{\tau} = -T \frac{d\tau}{\tau}.$$

Интегрируем, при условии $T = \text{const}$:

$$t = -T \ln \tau + k'.$$

Принимая для начала охлаждения $t=0$ начальную температуру двигателя τ_0 неравной нулю, т. е. выше температуры окружающей среды, имеем значение постоянной $k' = T \ln \tau_0$ и, вводя его:

$$t = -T \ln \tau + T \ln \tau_0, \\ -\frac{t}{T} = \ln \tau - \ln \tau_0 = \ln \frac{\tau}{\tau_0} \text{ или } e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\tau}{\tau_0},$$

откуда искомая температура к моменту t охлаждения

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (276)$$

Из сравнения этого уравнения с уравнением нагрева

$$\tau = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

видно, что кривая охлаждения является зеркальным отражением кривой нагревания при одной и той же величине постоянной T . Последнее условие верно лишь для некоторых частных случаев, например для двигателей с искусственным охлаждением от постороннего вентилятора. Таким образом общее ур-ние (275) показывает, что всякому процессу нагрева сопутствует процесс охлаждения в той или иной мере в зависимости от достигнутой температуры τ .

Итак, для построения кривых нагревания необходимо лишь знать величину установившейся температуры τ_n (или начальной τ_0 для

кривой охлаждения) и постоянную времени нагревания T или охлаждения T_0 (если T_0 не равна T).

Пользуясь таблицей 65 значений экспоненциальных функций $\tau = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = \tau_n \left(1 - e^{-x}\right)$ для различных значений x от нуля до 6,91, можно видеть, что для

$t=0$	$x=0$	и	$\tau=0$
$t=T$	$x=1$		$\tau=0,632 \tau_n$
$t=2T$	$x=2$		$\tau=0,9 \tau_n$
$t=3T$	$x=3$		$\tau=0,95 \tau_n$
$t=6,91T$	$x=6,91$		$\tau=0,999 \tau_n$

Если, приняв за параметр нагрузку, т. е. потери W , построить по таким точкам пучок кривых нагревания для одного и того же двигателя, обладающего постоянным значением T для разных нагрузок (что можно допустить в исключительных случаях), то из хода всех кривых (фиг. 295) будет ясен общий характер процесса нагрева: сначала температура растет быстро, когда все тепло идет на нагрев активных частей двигателя, и „начальный“ наклон кривых (касательных) характеризуется отношением

$$\frac{d\tau_0}{dt_0} = \frac{W}{C}.$$

ТАБЛИЦА 65.

x	e^{-x}	$1 - e^{-x}$	x	e^{-x}	$1 - e^{-x}$
0,0	1,0	0,0	2,303	0,1	0,9
0,104	0,9	0,1	2,41	0,09	0,91
0,223	0,8	0,2	2,525	0,08	0,92
0,287	0,75	0,25	2,66	0,07	0,93
0,358	0,70	0,30	2,815	0,06	0,94
0,511	0,60	0,40	3,0	0,05	0,95
0,693	0,50	0,50	3,22	0,04	0,96
0,917	0,40	0,60	3,51	0,03	0,97
1,00	0,368	0,632	3,68	0,025	0,975
1,25	0,3	0,7	4,19	0,015	0,985
1,386	0,25	0,75	4,61	0,010	0,99
1,609	0,20	0,80	5,29	0,005	0,995
1,898	0,15	0,85	6,91	0,001	0,999
2,00	0,135	0,865			

Таким образом, чем больше W при $C = \text{const}$, тем круче идет начальный рост температуры.

Затем, по мере того как двигатель как бы „насыщается“ теплом, преобладающее влияние на характер кривой, все более и более пологой, начинает оказывать „теплоотдача“ A .

Наконец, через промежуток времени, тем больший, чем больше отношение $\frac{C}{A}$ (т. е. постоянная T данного двигателя), наступает установившееся состояние температуры $\tau_n = \frac{W}{A}$, не зависящей от C .

Так как по нормам температура признается установившейся, если приращение ее за 1 час не превышает 2°C , т. е. $4-5\%$ от τ_n , то естественно, что в практике окончание нагрева считается достигнутым через промежуток времени, равный $3T$ сек., когда $\tau = 0,95 \tau_n$, как видно из табл. 65, а окончание охлаждения от τ_n до температуры окружающей среды через $3T_0$ сек., где T_0 — постоянная времени охлаждения.

Отсюда видно, что действительное время нагрева и охлаждения приблизительно в три раза превышает теоретическое (без отдачи тепла), и таким образом теоретическая величина T приобретает совершенно определенное практическое значение.

Значение это в дальнейшем будет еще более обосновано.

Поэтому предлагаемые ниже методы определения величины T не лишены практического интереса.

§ 3. Определение величины T .

1) Прежде всего величину T имеющегося двигателя можно определить из основного выражения $T = \frac{\Sigma c_0 G}{\Sigma p F}$ путем обмера. Однако отмеченная уже сложность подсчета теплоотдачи различных частей поверхности двигателя, тем более при различных скоростях, делает этот способ пригодным лишь для закрытых двигателей, обладающих притом жесткой характеристикой, т. е. неизменной скоростью. В этом случае можно ограничиться учетом лишь наружной поверхности и постоянным значением μ .

Насколько влияет перемена скорости на величину A и T закрытого двигателя с мягкой характеристикой, можно видеть из табл. 66 подсчетов A , C и T для закрытого серийс-двигателя в 36 л. с. в зависимости от силы тока (нагрузки *).

ТАБЛИЦА 66.

Сила тока (в амперах)	25	40	64	120
Скорость вращения в об/мин	860	680	560	410
Потери в ваттах	710	1180	2250	6580
$A = \mu_0 (1 + \beta \sqrt{v}) F$	9,3	8,6	8,0	7,1 $\frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C}}$
$\frac{d\tau_0}{dt_0}$	0,42	0,7	1,3	4 $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$
$C = W: \frac{d\tau_0}{dt_0}$	28,4	28,2	28,8	27,4 $\frac{\text{Wh}}{^{\circ}\text{C}}$
$T = \frac{C}{A}$ (часов)	3,05	3,28	3,6	3,85

Хотя закрытый двигатель обеспечивает меньшие колебания „теплоотдачи“ A , чем открытый, т. е. при теплоотдаче только с наружной поверхности влияния вентиляции (скорости вращения) здесь значительно меньше, тем не менее при почти постоянной величине C значения A меняются в пределах свыше 30% . О влиянии на коэффициент теплоотдачи рода двигателя (в смысле распределения потери) и режима работы будет сказано ниже.

*) См. Засфельнер, Электрическая тяга.

2) Если же величину T считать неизменной при различных нагрузках, то ее можно определить, зная какие-либо две мощности данного двигателя, например часовую P_h и продолжительную P_D , соответствующие им потери W_h и W_D и принимая достигаемые температуры τ_h и τ_D равными τ_n :

$$\tau = \frac{W}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

или

$$e^{-\frac{t}{T}} = 1 - \tau \cdot \frac{A}{W},$$

или

$$\frac{t}{T} = -\ln \left(1 - \tau \frac{A}{W} \right).$$

Вводя $A = \frac{W_D}{\tau_D}$, имеем при часовой работе ($t = 60$ min) для T в минутах:

$$\frac{60}{T} = -\ln \left(1 - \frac{\tau_h}{\tau_D} \cdot \frac{W_D}{W_h} \right) = -\ln \left(1 - \frac{W_D}{W_h} \right)$$

или

$$T = -\frac{60}{\ln \left(1 - \frac{W_D}{W_h} \right)}. \quad (277)$$

3) Величину T можно получить и графическим путем, как легко доказать из ур-ния (272):

$$\tau_n = T \frac{d\tau}{dt} + \tau.$$

Для начала нагрева, когда $\tau = 0$, имеем:

$$\tau_n = T \frac{d\tau_0}{dt_0},$$

где $\frac{d\tau_0}{dt_0}$ — тангенс начального угла наклона. На чертеже (фиг. 296) искомое значение T представлено отрезком BC на асимптоте, соответствующей τ_n .

Далее, если к рассматриваемому моменту времени $t = 0$ двигатель уже имеет температуру выше окружающей, то из кривой нагревания, построенной для такого случая (конечно более пологой), можно было бы убедиться, что новая касательная, проведенная в точке, соответствующей $t = 0$, пересечет асимптоту в той же точке C и, следовательно, определит ту же постоянную времени T , независимо от начальной температуры двигателя. Проводя касательную в любой точке A' кривой, получим отрезок BC' , равный по величине BC .

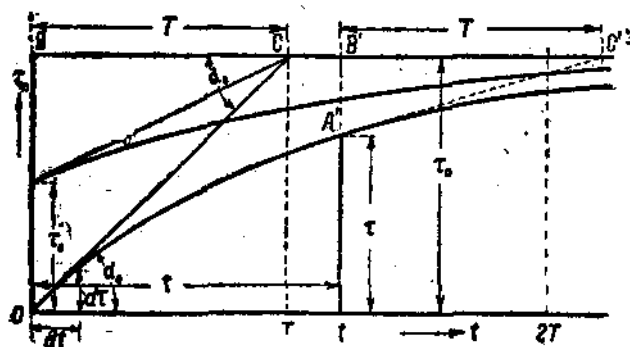
В этом графическом определении T температурная кривая предполагалась известной, построенной по ур-нию (275) и, следовательно, по известным постоянным величинам A и C .

4) Если, однако, они неизвестны, то кривую нагрева можно получить опытным путем и затем найти T только что изложенным способом. Не надо только упускать из вида трудность получения средней температуры всего двигателя, так как в случае измерения τ в одном каком-либо месте двигателя кривая представит нагрев именно этой части, и полученная величина T будет относиться к ней, а не ко всему двигателю в целом.

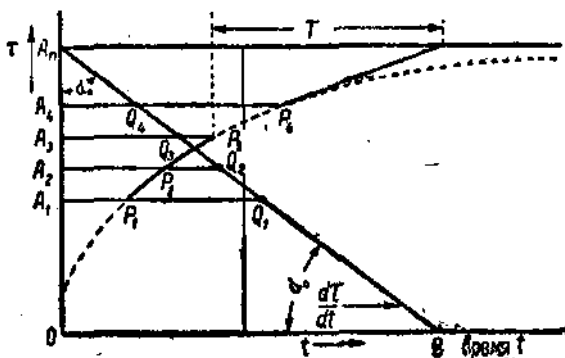
Так как, однако, такое опытное получение кривой вплоть до установившегося теплового равновесия является весьма длительным, то можно предложить следующий способ, весьма, впрочем, приблизительный:

Наносим в координатной системе $\frac{\tau}{t}$ несколько точек: P_1, P_2, P_3, P_4 (фиг. 297), полученных наблюдением, и проводим через них плавную кривую, составляющую участок полной температурной кривой. Затем определяем для какой-либо точки (например P_4) наклон кривой: $\frac{d\tau}{dt} = \operatorname{tg} \alpha_4$ и откладываем эту величину на линии $A_4 P_4$ в виде отрезка $A_4 Q_4$ в масштабе $\frac{\tau}{t}$. Поступая таким же образом далее, соединяем полученный ряд точек: $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 \dots$ общей линией, которая весьма близка к прямой, в особенности в верхней ее части. Продолжаем эту прямую до пересечения с осью ординат в точке A_* и через нее проводим горизонтальную прямую, которая, как это ясно из существа построения, будет асимптотой к искомой температурной кривой, так как при этом $\frac{d\tau}{dt} = 0$.

Итак, отрезок OA представит установившуюся температуру τ_* .



Фиг. 296.



Фиг. 297.

Продолжая прямую в другую сторону до пересечения с осью абсцисс, получим отрезок OB , характеризующий максимальный, т. е. начальный, наклон кривой нагревания, и, следовательно, отношение $\frac{OA_n}{OB} = \frac{\tau_n}{\lg \alpha_0}$ представит постоянную времени T .

Это построение совершенно отвечает логарифмическому ур-нию (275), эквивалентному ур-нию (272), так как прямая A_nB представляет зависимость τ от $\frac{d\tau}{dt}$.

Полученные таким сокращенным путем значения температурной кривой и постоянной времени T отступают от действительных своих значений тем больше, чем большую роль играет теплопроводность внутренних частей двигателя, так как при выводе основного уравнения мы предполагали температуру во всех частях его одинаковой. Однако для практических целей точность полученного значения T является удовлетворительной, между тем способ дает значительное сбережение времени и стоимости опыта (по меньшей мере в 2—3 раза).

5) Лучшие результаты дает аналитический способ упрощенного подсчета T , основанный также на опытном замере трех температур τ_1 , τ_2 и τ_3 через равные промежутки времени; если, например, первая точка τ_1 замерена через t_1 минут после начала опыта, τ_2 через t_2 минут и τ_3 через t_3 минут, то $\Delta t = t_3 - t_2 = t_2 - t_1$.

Тогда

$$\tau_1 = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right) \quad \text{или} \quad \tau_n - \tau_1 = \tau_n e^{-\frac{t_1}{T}};$$

$$\tau_2 = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T}}\right) \quad \text{или} \quad \tau_n - \tau_2 = \tau_n e^{-\frac{t_2}{T}};$$

$$\tau_3 = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_3}{T}}\right) \quad \text{или} \quad \tau_n - \tau_3 = \tau_n e^{-\frac{t_3}{T}},$$

откуда

$$\frac{\tau_n - \tau_3}{\tau_n - \tau_1} = \frac{e^{-\frac{t_3}{T}}}{e^{-\frac{t_1}{T}}} = e^{-\frac{t_3}{T} - \left(-\frac{t_1}{T}\right)} = e^{-\frac{t_3 - t_1}{T}} = e^{-\frac{\Delta t}{T}}. \quad (278')$$

Из основного уравнения

$$\tau = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

имеем, вычитая по τ_0 :

$$\begin{aligned} \tau - \tau_0 &= \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} - \tau_0 = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) - \\ &- \tau_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = (\tau_n - \tau_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right); \end{aligned}$$

аналогично:

$$\tau_2 - \tau_1 = (\tau_n - \tau_1) \left(1 - e^{-\frac{t_2 - t_1}{T}}\right) = (\tau_n - \tau_1) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right);$$

$$\tau_3 - \tau_2 = (\tau_n - \tau_2) \left(1 - e^{-\frac{t_3 - t_2}{T}}\right) = (\tau_n - \tau_2) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right),$$

или, деля последнее на предпоследнее:

$$\frac{\tau_3 - \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\tau_n - \tau_2}{\tau_n - \tau_1}.$$

Вводя полученное ранее выражение (278')

$$\frac{\tau_3 - \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} = e^{-\frac{\Delta t}{T}} \quad \text{или} \quad e^{\frac{\Delta t}{T}} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2},$$

имеем окончательно

$$T = \frac{\Delta t}{\ln \left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2} \right)}. \quad (278)$$

Необходимо, однако, ввести целый ряд оговорок к изложенным способам получения T .

Самым затруднительным, как уже сказано, является получение средней температуры для определения средней величины T всего двигателя, так как иначе будут определены частные постоянные T якоря, обмоток, индукторов и т. д., значительно различающиеся между собой; так, для указанного уже закрытого серийс-двигателя мощностью 36 л. с.:

T для якоря ≈ 180 мин.	= 3 часа
T " коллектора	= 3 "
T " обмотки главных полюсов	= $4\frac{1}{2}$ часа
T " " вспомогат. полюсов	= 5 час.

Кроме того, как показывают опыты, кривая нагрева обмоток наиболее отклоняется от экспоненциальной.

Во всяком случае даже приблизительное определение T все же весьма ценно для выбора двигателя, так как колебания ее значения для различных двигателей чрезвычайно велики — от 30 мин. до нескольких часов.

Причины последнего многообразны и ясны из предыдущего: на среднюю величину T „гомогенного“ двигателя влияют и род двигателя, и тип его, и величина, что вполне понятно из самого его выражения $T = \frac{\Sigma c_0 G}{\Sigma \mu F}$:

1) Влияние рода двигателя, помимо различного веса единицы мощности, объясняется главным образом конструктивным распределением обмоток. Если сравнить, например, закрытые двигатели постоянного и трехфазного тока (шунтовой и асинхронный), то, допуская даже одинаковый вес, нетрудно представить себе, что отдача тепла последнего будет значительно выше как от его ста-

тора, где обмотки заложены непосредственно во внешнем обode, так и от ротора, благодаря меньшему междужелезному пространству.

2) Еще сильнее влияние типа двигателя по способу защиты, вентиляции и скорости вращения. Естественно, что постоянная T закрытого двигателя будет значительно больше T открытого двигателя того же рода и мощности, так как числитель (вес) будет больше, а знаменатель — меньше. По тем же причинам для тихоходного двигателя T больше, чем для быстроходного.

Но даже для одного и того же рода и типа (защиты), например закрытого асинхронного двигателя, величина μ может сильно меняться в зависимости от распределения потерь, т. е. коэффициента потерь $\alpha = \frac{k}{v}$. Так, по данным

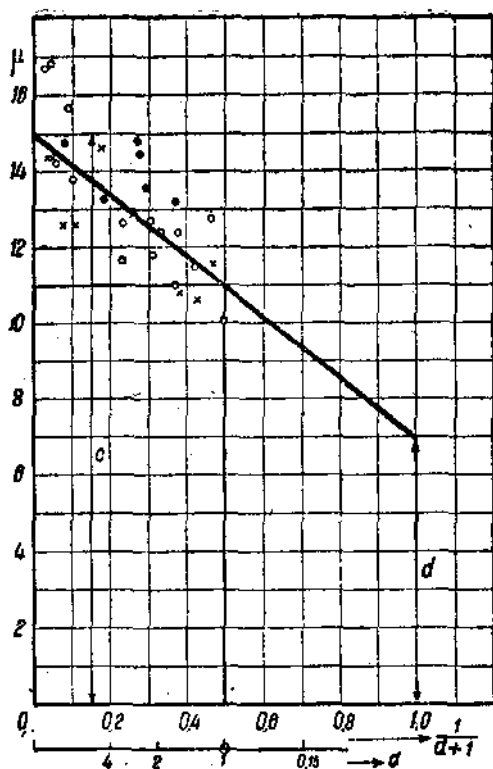
инж. Лившица (S. S. W.) для закрытых асинхронных двигателей коэффициент μ изменяется в пределах от крайнего минимума $\mu = 7 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ до крайнего

максимума $\mu = 15 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ в зависимости от отношения переменных потерь v к общим потерям $k + v$, т. е. от $\frac{1}{1 + \alpha}$, где $\alpha = \frac{k}{v}$ — отношение постоянных потерь к переменным потерям.

Как видно из фиг. 298, для коэффициента $\alpha = 1$, $\mu = 11 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$; чем меньше пере-

менные потери и больше коэффициент α , тем ближе источник развития тепла (железные потери) к наружной поверхности и тем больше μ и A .

3) Вполне понятно из предыдущего и влияние величины, т. е. мощности, двигателя на величину T . Характерны в этом отношении пределы T , указываемые Mr. P. Grice (J. of J. E. E., Vol. LI, стр. 840) для различных типов двигателей в зависимости от диаметра якоря: а) для открытых двигателей: значение T колеблется от 1,67 часа для якорей диаметром до 24", до 1,67 — 2,5 часа для якорей диаметром от 24" до 100"; б) для закрытых двигателей: значение T колеблется от 1,67 до 3,33 часа для якорей до 15" и от 3,33 до 5 часов — диаметром от 15" до 26". Для вентилируемых двигателей T ниже (от 0,67 до 1,67).



Фиг. 298.

В заключение можно еще отметить влияние на величину T подвижности двигателя (например тяговых двигателей); если обозначить через β отношение T вращающегося двигателя к T_0 неподвижного, то по ур-нию (266'):

$$\beta = \frac{T}{T_0} = \frac{c_0 G \cdot \mu_0 F}{c_0 G \cdot \mu F} = \frac{\mu_0}{\mu} = \frac{\mu_0}{\mu_0 (1 + \lambda \sqrt{v})} = \frac{1}{1 + \lambda \sqrt{v}},$$

Аналогично влияние вентиляции и вращения якоря, причем $\beta = 1,0$ для трансформаторов, реостатов и тому подобной стационарной аппаратуры;

$\beta = 0,7$ для закрытых двигателей;

$\beta = 0,5$ для открытых двигателей без искусственной вентиляции;

$\beta = 0,33$ для открытых двигателей с искусственной вентиляцией.

Выяснив основной закон нагревания и охлаждения двигателей и сложность применения общего ур-ния (274) для практических случаев электрического привода, покажем в дальнейшем применение упрощенного ур-ния (275) при подборе мощности двигателя в конкретных условиях различных режимов работы: продолжительной, кратковременной и прерывистой (повторно-кратковременной).

§ 4. Продолжительная работа (нагрузка).

Из предыдущего определения мощностей по Нормам видно, что продолжительная работа ограничивается лишь в отношении „минимума“ времени тем, что двигатель во всяком случае достигает установившегося теплового состояния.

Согласно уравнению (275) и кривой нагрева, последнее состояние достигается теоретически бесконечно долго, а практически, с точностью в 5%, через 3 T секунд, когда приращение температуры за 1 час не превышает 2° С.

Таким образом искомым „минимум“ продолжительности нагрузки есть 3 T секунд.

Количество и длительность остановок между такими периодами работы, иными словами предварительный нагрев, не может иметь влияния на конечную температуру и, следовательно, на выбор мощности двигателя, что ясно из самого существа уравнения экспоненциальной кривой и было показано на фиг. 296.

Если предположить нагрузку равной (см. классификацию в главе I), то для определения мощности не требуется построения кривой нагрева, а лишь знание постоянной времени T данного двигателя. Так как значение последней колеблется от нескольких минут до нескольких часов для различных двигателей, то и работа, являющаяся продолжительной для одного двигателя, может оказаться кратковременной для другого.

Если после выбора двигателя, которому соответствует определенная величина T , продолжительность работы окажется значительно менее 3 T секунд, то двигатель, выбранный по нагрузке, т. е. по вращающему моменту, очевидно не будет использован по нагреву. Во сколько раз можно уменьшить его мощность, чтобы температура по окончании работы отвечала нормам, будет сказано далее, при изложении методов выбора двигателя при кратковременной и прерывистой работе.

Что касается неровной продолжительной работы, практически более частой, то даже в самом сложном случае изменения нагрузки, не подчиняющегося какому-либо закону, всякую кривую нагрузки можно заменить эквивалентной ступенчатой линией (см. главу I) и затем к ней приложить все те методы, которые далее излагаются на конкретных примерах прерывистой работы. Отличие будет заключаться лишь в длительности подсчетов, распространяемых на весь период (например смену). Однако большей частью удается ограничиться меньшим циклом, подметив повторяемость их: например в типичном случае электропривода прокатного reversingного стана нагрузка колеблется по величине (от холостого хода до максимального) и по времени (соответственно удлинению металла); тем не менее цикл повторяется по окончании определенного числа проходов, и вполне естественно и правильно ограничиться только этим циклом при определении мощности, например излагаемым ниже методом эквивалентного или средне-квадратичного тока. Построение же кривой нагревания необходимо продолжать до тех пор, пока определенные участки ее не начнут повторяться одними и теми же точками максимальных пиковых температур.

§ 5. Кратковременная работа (нагрузка).

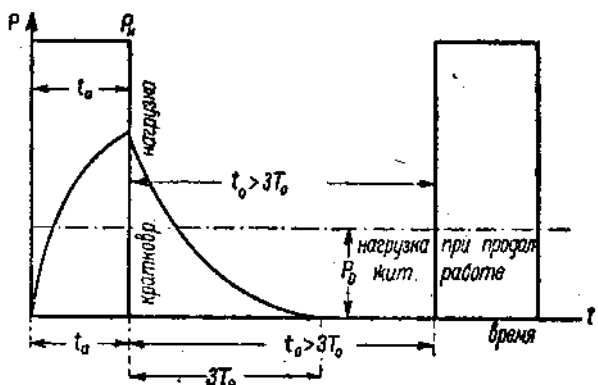
При такой работе периоды включения существенно короче, чем $3T$, а паузы — весьма продолжительны и по меньшей мере равны продолжительности времени охлаждения $3T_0$.

Различие в значениях T и T_0 *) в данном случае существенной роли не играет на том основании, что здесь не приходится делать определения температуры охлаждения после паузы, так как а priori известно, что охлаждение будет полное.

При кратковременной работе по большей части допускают, что нагрузка электродвигателя в период включения постоянна или почти постоянна.

На фиг. 299 представлена диаграмма такой кратковременной работы.

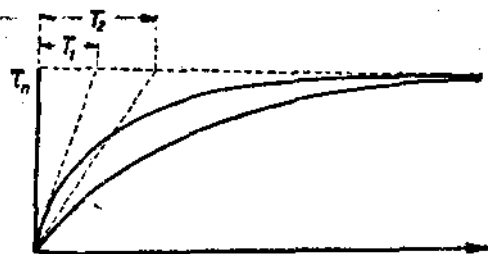
При ней нагрузка прекращается, очевидно, ранее достижения теплового равновесия. Если мы желаем и в этом случае правильно использовать двигатель до нормального нагрева, то надо взять его значительно меньшим по мощности, чтобы его так называемая продолжительная мощность P_D была значительно меньше ве-



Фиг. 299.

*) Для закрытого трехфазного двигателя $\beta = \frac{T}{T_0}$ в среднем равно 0,7.

личины P_k , отвечающей кратковременной нагрузке, иными словами, надо кратковременно перегрузить его. Соответственно большим потерям W , процесс нагрева при перегрузке выразится, конечно, более крутым подъемом температурной кривой $\frac{d\tau}{dt}$, как было показано на фиг. 295; при этом преобладающую роль получит тепло-воспринимающая способность электродвигателя C , т. е. теплоемкость активных материалов и их количество (вес).



Фиг. 300.

На фиг. 295 было представлено влияние нагрузки и потерь для одного и того же двигателя при одной и той же T .

Легко себе представить влияние величины T различных типов двигателей при одной и той же нагрузке. Чем больше T , тем медленнее происходит нагрев (фиг. 300).

Если совместить оба влияния, то станет ясным следующее свойство электродвигателя, а именно что отношение так называемой „кратковременной“ мощности электродвигателя P_k к его „продолжительной“ мощности P_D будет тем больше, чем больше постоянная времени электродвигателя T , т. е. чем больше отношение $\frac{C}{A}$.

Наибольшего отношения этих мощностей $\frac{P_k}{P_D}$ надо ожидать у тихоходных закрытых электродвигателей постоянного тока.

Вопрос о перегрузке двигателя может быть решен или аналитически, или графически.

а) Аналитический (расчетный) метод. Из чертежа (фиг. 295) мы знаем, что при выделении двигателем в единицу времени некоторого количества тепла, например W_n , установившаяся температура τ_n достигается через бесконечно долгое время $t_n = \infty$.

Следовательно, по ур-ниям (267) и (275) при $T = \text{const}$ имеем, предполагая начальную температуру $\tau_0 = 0$:

$$\frac{W_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T}} \right) = \tau_n.$$

При кратковременной же нагрузке, соответствующей потерям (теплу) $W_k > W_n$, температура τ_n будет достигнута через промежуток времени t_k , соответствующий уравнению

$$\frac{W_k}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{T}} \right) = \tau_n.$$

Из отношения этих уравнений имеем при $t_n = \infty$:

$$\frac{W_n}{W_k} = \frac{1 - e^{-\frac{t_k}{T}}}{1 - e^{-\infty}} = 1 - e^{-\frac{t_k}{T}}$$

и, следовательно,

$$e^{\frac{t_k}{T}} = \frac{W_k}{W_k - W_n}$$

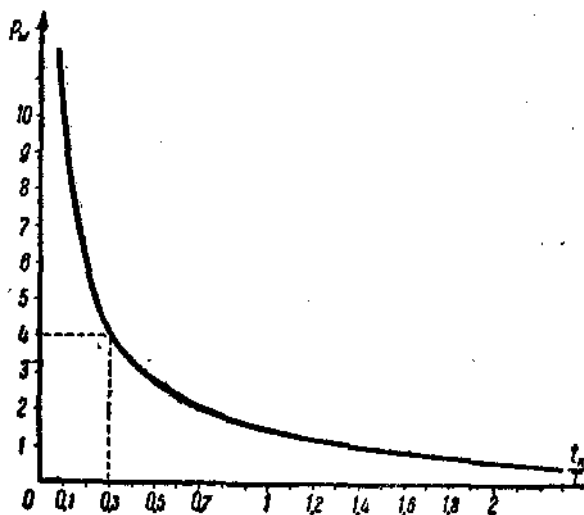
или искомый период работы:

$$t_k = T \ln \frac{W_k}{W_k - W_n}. \quad (279)$$

Обозначив $\frac{W_k}{W_n} = p_n$, назовем это отношение тепловой способностью к перегрузке или „термическим коэффициентом перегрузки“. Величина эта всегда больше единицы, так как $W_k > W_n$. Разделив в ур-нии (279) числитель и знаменатель логарифма на W_n , получим:

$$\frac{t_k}{T} = \ln \frac{p_n}{p_n - 1}. \quad (279')$$

На фиг. 301 представлена кривая зависимости p_n от $\frac{t_k}{T}$, построенная по этому уравнению. Отсюда видно большое значение величины постоянной времени T электродвигателя. Знание ее дает возможность по уравнению или кривой получить допустимую перегрузку для любых условий работы. Так, например, если $T = 120$ минут, а период работы $t_k = 36$ минут и, следовательно, $\frac{t_k}{T} = 0,3$, то для p_n имеем значение 4. Это значит, что двигатель в тепловом отношении можно перегружать в течение этого времени в 4 раза против тепла, соответствующего его нормальной длительной нагрузке.



Фиг. 301.

Если при перегрузке пренебречь так называемыми „постоянными“ потерями, как иногда в практике допускается, то, учитывая пропорциональность переменных потерь квадрату тока, получим,

что отношение кратковременной мощности P_k к длительной P_D будет приблизительно равно [см. далее ур-ние (288'')]:

$$p_m = \frac{P_k}{P_D} = \frac{\sqrt{W_k}}{W_n} = \sqrt{p_w}.$$

В данном примере

$$p_m = \sqrt{p_w} = \sqrt{4} = 2.$$

Это отношение p_m кратковременной и продолжительной мощностей называется просто перегрузочной способностью двигателя или механическим коэффициентом перегрузки в отличие от термического p_w .

Так как значение коэффициента потерь α варьирует в широких пределах (0,5—2), то пренебрежение постоянными потерями в некоторых случаях будет грубейшей ошибкой.

б) Графический метод. Способов решения задачи графическим путем предложено несколько. Один из наиболее употребительных основан на том, что если построить лекало по одной какой-либо кривой нагревания, например по наивысшей кривой, соответствующей наивысшей нагрузке, то с помощью его можно прочертить весь пучок кривых, соответственно лишь передвигая лекало параллельно самому себе. Если на фиг. 295 через точку, соответствующую конечной температуре τ_n (на оси ординат), провести линию, параллельную оси абсцисс, то получится ряд точек пересечения ее с пучком кривых, абсциссы которых: $t_1, t_2, \dots$ и т. д.

Время, соответствующее им, представляет допустимые периоды работы для соответствующих нагрузок (и, следовательно, соответствующих потерь: $W_1, W_2, \dots$), по истечении которых двигатель достигнет температуры τ_n .

Если бы двигатель работал длительно с потерями $W_1, W_2, \dots$, то, как это видно из чертежа, он достиг бы температуры соответственно гораздо более высокой, чем τ_n . Такие нагрузки, выдерживаемые двигателем при нормальном нагреве лишь в течение короткого времени, и определяют ту или другую допустимую перегрузку его, т. е. „кратковременную“ мощность.

Итак, чем короче время, тем больше та перегрузка, которую двигатель выдержит, нагреваясь до нормы. О таких перегрузках, которые он может выдерживать лишь чрезвычайно короткое время, будет сказано особо. *)

§ 6. Прерывистая работа.

(Немецкое „Aussetzbetrieb“, английское „intermittend working“).

Если периоды работы меньше времени, необходимого для полного нагрева двигателя, а паузы между периодами включения короче времени, необходимого для полного охлаждения его, то такая

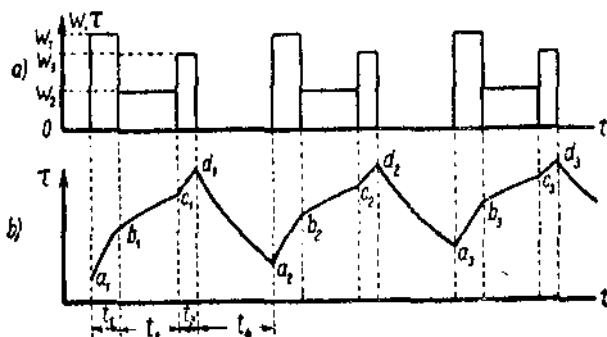
*) Практически имеют большое распространение и нормированы рабочие периоды $t_k = 10$ мин., 30 мин., 60 мин. и 90 мин. (соответственные кратковременные мощности в немецких каталогах носят название „Zeitleistung“ или „Prüfleistung“). Если иметь T двигателя, то по кривой фиг. 301 легко можно определить все эти кратковременные мощности, давая t_k значения: 10 мин., 30 мин., 60 мин. или 90 мин.

работа называется прерывистой или повторно-кратковременной. Здесь изучение процесса охлаждения в периоды остановки должно получить особое значение при выборе мощности, так как температура, до которой дойдет охлаждение двигателя в течение перерыва, не безразлична, как это было в случае продолжительной работы.

Практически можно грубо различать два рода такой работы:

1) либо нагрузка в период работы постоянна, и, следовательно, нагрузочная диаграмма представляет правильное чередование „прямоугольников“ работы с паузами; если допустить, что во время паузы двигатель не отключается от сети, а вращается вхолостую, то получим случай продолжительной неравномерной нагрузки;

2) либо, что еще чаще, нагрузка в рабочий период изменяется по более или менее сложному закону; от этого вида диаграммы можно всегда перейти к первому виду путем известного упрощения.



Фиг. 302.

Кроме того может изменяться и длительность пауз t_0 между отдельными циклами работы.

Исследовать особенности явлений, имеющих место в случае прерывистой работы, можно как аналитически, так и графически.

а) Аналитический способ. Рассмотрим, например, случай работы двигателя, представленной на фиг. 302, а, где:

t_1 — продолжительность периода пуска двигателя;

t_2 — „ „ работы его с установившейся скоростью;

t_3 — „ „ торможения;

t_4 — „ „ паузы, когда двигатель бывает отключен от сети.

Подобный вид имеют нагрузочные диаграммы подъемных установок, реверсивных прокатных станков, строгальных станков и т. д.

Значения величин $\tau_n = \frac{W}{A}$ и $T = \frac{C}{A}$ назовем для отдельных периодов работы соответственно через $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ и T_1, T_2, T_3, T_4 . Хотя во время паузы $W_4 = 0$, однако для общего вида уравнений будем считать τ_4 неравным нулю. Превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды в начале процесса работы для точки a_1 обозначим через τ_{a1} .

Изменение температуры τ в рассматриваемом случае будет, очевидно, идти по кривым фиг. 302, б.

Значения τ для точек b_1, c_1, a_1, b_2 и т. д. обозначим соответственно через $\tau_{b_1}, \tau_{c_1}, \tau_{a_1}, \tau_{a_2}, \tau_{b_2}$ и т. д. В таком случае, применяя формулу (275) к отдельным периодам работы двигателя, получим:

$$\tau_{a_1} = \tau_0;$$

$$\tau_{b_1} = \tau_{a_1} e^{-\frac{t_1}{T_1}} + (1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) \tau_1 = \tau_0 e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \tau_1 (1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}});$$

$$\tau_{c_1} = \tau_{b_1} e^{-\frac{t_2}{T_2}} + \tau_2 (1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}) = \tau_0 e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2}\right)} + \\ + \tau_1 (1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) e^{-\frac{t_2}{T_2}} + \tau_2 (1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}});$$

$$\tau_{a_1} = \tau_{c_1} e^{-\frac{t_3}{T_3}} + \tau_3 (1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}}) = \tau_0 e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3}\right)} + \\ + \tau_1 (1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) e^{-\left(\frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3}\right)} + \tau_2 (1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}) e^{-\frac{t_3}{T_3}} + \tau_3 (1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}});$$

$$\tau_{a_2} = \tau_{a_1} e^{-\frac{t_4}{T_4}} + \tau_4 (1 - e^{-\frac{t_4}{T_4}}) = \tau_0 e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_1 (1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) e^{-\left(\frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \tau_2 (1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}) e^{-\left(\frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_3 (1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}}) e^{-\frac{t_4}{T_4}} + \tau_4 (1 - e^{-\frac{t_4}{T_4}});$$

$$\tau_{b_1} = \tau_{a_2} e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \tau_1 (1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) = \tau_0 e^{-\left(2\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_1 (1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) e^{-\left(\frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_2 (1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \tau_3 (1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}}) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_4 (1 - e^{-\frac{t_4}{T_4}}) e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \tau_1 (1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}});$$

$$\tau_{c_1} = \tau_{b_1} e^{-\frac{t_2}{T_2}} + \tau_2 (1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}) = \tau_0 e^{-\left(2\frac{t_1}{T_1} + 2\frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_1 (1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + 2\frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_2 (1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_3 (1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}}) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \tau_4 (1 - e^{-\frac{t_4}{T_4}}) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2}\right)} + \\ + \tau_1 (1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) e^{-\frac{t_2}{T_2}} + \tau_2 (1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}});$$

$$\begin{aligned} \tau_{d_2} = \tau_{d_1} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \tau_3 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}\right) = \tau_0 \cdot e^{-\left(2\frac{t_1}{T_1} + 2\frac{t_2}{T_2} + 2\frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}\right) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + 2\frac{t_2}{T_2} + 2\frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_2 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}\right) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + 2\frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_3 \left(1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}}\right) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_4 \left(1 - e^{-\frac{t_4}{T_4}}\right) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3}\right)} + \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}\right) e^{-\left(\frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3}\right)} + \\ + \tau_2 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}\right) e^{-\frac{t_3}{T_3}} + \tau_3 \left(1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}}\right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{d_3} = \tau_{d_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \tau_4 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}\right) = \tau_0 \cdot e^{-2\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + 2\frac{t_2}{T_2} + 2\frac{t_3}{T_3} + 2\frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_2 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}\right) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + 2\frac{t_3}{T_3} + 2\frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_3 \left(1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + 2\frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_4 \left(1 - e^{-\frac{t_4}{T_4}}\right) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \tau_2 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)} + \\ + \tau_3 \left(1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}}\right) e^{-\frac{t_4}{T_4}} + \tau_4 \left(1 - e^{-\frac{t_4}{T_4}}\right). \end{aligned}$$

Закон составления уравнений ясен. Так, после k -го периода торможения температура двигателя будет:

$$\begin{aligned} \tau_{d_k} = \tau_0 \cdot e^{-\left[k\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right) - \frac{t_4}{T_4}\right]} + \\ + \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}\right) \cdot \left\{ \frac{e^{-\left(\frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3}\right)} \cdot \left[1 - e^{-k\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)}\right]}{1 - e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)}} \right\} + \\ + \tau_2 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}}\right) \cdot \left\{ \frac{e^{-\frac{t_3}{T_3}} \cdot \left[1 - e^{-k\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)}\right]}{1 - e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4}\right)}} \right\} + \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} & + \tau_3 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_3}} \right) \cdot \left[\frac{1 - e^{-k \left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4} \right)}}{1 - e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4} \right)}} \right] + \\ & + \tau_4 \left(1 - e^{-\frac{t_4}{T_4}} \right) \times \\ & \times \left[\frac{e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} \right)} \cdot \left[1 - e^{-(k-1) \cdot \left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4} \right)} \right]}{1 - e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4} \right)}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (280)$$

В скобках стоят результаты суммирования соответствующих геометрических прогрессий.

Точно так же можно получить аналогичного вида уравнение для определения τ_{dk} , τ_{dk} , τ_{ck} .

При $k = \infty$ имеем:

$$\begin{aligned} \tau_{d\infty} = & \frac{\tau_1 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}} \right) \cdot e^{-\left(\frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} \right)} + \tau_2 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}} \right) e^{-\frac{t_1}{T_1}}}{1 - e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4} \right)}} + \\ & + \frac{\tau_3 \left(1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}} \right) + \tau_4 \left(1 - e^{-\frac{t_4}{T_4}} \right) e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} \right)}}{1 - e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4} \right)}}. \end{aligned} \quad (280')$$

Как и следовало ожидать, установившаяся температура не зависит от начальной температуры τ_0 двигателя.

Положив $t_4 = 0$, получим из ур-ний (280) и (280') выражения для τ_{dk} и $\tau_{d\infty}$, отвечающие случаю работы двигателя по нагрузочной диаграмме фиг. 302, а. Если кроме того $\tau_0 = 0$, т. е. двигатель начинает работать, имея температуру окружающей среды, то из ур-ния (280) получим:

$$\begin{aligned} \tau_{dk} = & \frac{\tau_1 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}} \right) \cdot e^{-\left(\frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} \right)} + \tau_2 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}} \right) e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \tau_3 \left(1 - e^{-\frac{t_3}{T_3}} \right)}{1 - e^{-\left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4} \right)}} \times \\ & \times \left[1 - e^{-k \left(\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4} \right)} \right] \end{aligned} \quad (280'')$$

или, обозначая выражение, стоящее перед квадратными скобками, через τ_d и полагая

$$\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} + \frac{t_3}{T_3} + \frac{t_4}{T_4} = \frac{t_d}{T_d},$$

получим:

$$\tau_{dk} = \tau_d \left(1 - e^{-k \frac{t_d}{T_d}} \right), \quad (281)$$

откуда следует, что все точки d лежат на экспоненциальной кривой, ордината асимптоты которой равна τ_0 . То же самое можно доказать аналогичным образом и относительно точек a , b и c , именно:

$$\tau_{a,k} = \tau_a \left(1 - e^{-k \frac{t_2}{T_2}}\right); \quad \tau_{b,k} = \tau_b \left(1 - e^{-k \frac{t_2}{T_2}}\right); \quad \tau_{c,k} = \tau_c \left(1 - e^{-k \frac{t_2}{T_2}}\right).$$

Как видно, даже те упрощения, которые внесены предположением постоянства W , τ_n и T в отдельности для периодов пуска, установившейся работы, торможения и паузы, являются совершенно недостаточными для практических расчетов.

В качестве дальнейшего упрощения, связанного, конечно, с увеличением неточности, можно допустить постоянство величины W , τ_n и T в течение всего периода включения двигателя в сеть, различая во всем цикле работы двигателя лишь два режима: работы и интервала (паузы).

При этом значение W , принимаемое постоянным в течение всего периода включения двигателя, может быть определено по уравнению:

$$W = \frac{W_1 \cdot t_1 + W_2 \cdot t_2 + W_3 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}.$$

„Теплоемкость“ двигателя C можно принять постоянной в течение всего цикла (и в период включения и в период паузы), так как ее значение не зависит от того, вращается ли ротор электродвигателя или он неподвижен; что же касается изменения значения C с температурой, то в пределах нормального колебания температуры (около 50°C) изменение значения C столь невелико, что для практических расчетов им также можно пренебречь.

Иначе обстоит дело с теплоотдачей A двигателя. Степень ее изменения со скоростью вращения ротора зависит главным образом от типа двигателя и в первую очередь от системы охлаждения. Для закрытых двигателей отношение численного значения величины A_0 при неподвижном роторе к ее значению A при вращении ротора с номинальной скоростью составляет около $\frac{3}{4}$; для откры-

тых двигателей без вентиляции это отношение равно около $\frac{1}{2}$; наконец, для двигателей с вентилятором на валу оно достигает $\frac{1}{3}$. Из-

менением значения величины A с температурой (при колебаниях ее, допустимых без вреда для электродвигателя) можно пренебречь.

Имея в виду, что коэффициент $\beta = \frac{T}{T_0}$ означает отношение теплоотдачи A_0 при неподвижном роторе к теплоотдаче A при номинальной скорости вращения, найдем: $A_0 = \beta A$. Для периодов пуска и торможения можно принять $A' = \frac{A + A_0}{2} = A \cdot \frac{1 + \beta}{2}$. Тогда для

всего периода включения двигателя можно положить:

$$A_s = \frac{A' \cdot t_1 + A_2 \cdot t_2 + A' \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3} = A \frac{2t_2 + (1 + \beta) \cdot (t_1 + t_3)}{2(t_1 + t_2 + t_3)}.$$

После такого рода упрощений диаграмма фиг. 302 примет вид, представленный на фиг. 303, а, а изменение температуры изобразится кривыми фиг. 303, б.

Обозначим через:

τ_m — установившуюся температуру двигателя, отсчитываемую от температуры окружающей среды при условии непрерывного выделения в нем тепла в количестве $W \frac{J}{sec}$ или $\frac{W \cdot sec}{sec}$;

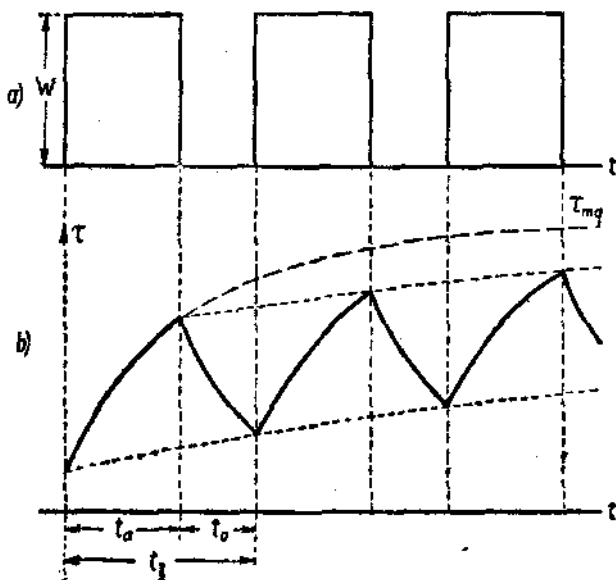
τ_2 — установившийся нагрев двигателя в начале паузы при прерывистой работе по диаграмме фиг. 303, а;

τ_1 — установившийся нагрев двигателя в конце паузы;

t_a — продолжительность периода включения в течение одного цикла;

t_o — продолжительность периода паузы в течение одного цикла;

t_s — продолжительность периода одного цикла;



Фиг. 303.

$T = \frac{C}{A}$ — тепловую постоянную времени в период включения;

$T_o = \frac{C}{A_o}$ — тепловую постоянную времени в период паузы;

$$\beta = \frac{T}{T_o} = \frac{A_o}{A};$$

$\epsilon = \frac{t_a}{t_a + t_o} = \frac{t_a}{t_s}$ — относительную продолжительность включения двигателя;

$$k_1 = \frac{t_s}{T};$$

$$k_2 = \frac{t_s}{T_o};$$

t_n — время, в течение которого двигатель получит нагрев τ , при условии непрерывного выделения в нем тепла в количестве W джоулей в 1 сек.

При такого рода обозначениях будем иметь ряд следующих основных соотношений:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T}} \right); \\ \tau_2 &= \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t_a + t_n}{T}} \right); \\ \tau_1 &= \tau_2 e^{-\frac{t_0}{T}}.\end{aligned}$$

Из первого уравнения находим:

$$t_n = T \ln \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau_1}.$$

Подставляя во второе уравнение, получаем, как и следовало ожидать:

$$\tau_2 = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) + \tau_1 e^{-\frac{t_a}{T}}.$$

Заменяя здесь τ_1 его значением из уравнения

$$\tau_1 = \tau_2 e^{-\frac{t_0}{T}},$$

будем иметь:

$$\tau_m \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) = \tau_2 \left[1 - e^{-\left(\frac{t_a}{T} + \frac{t_0}{T} \right)} \right].$$

Так как

$$\frac{t_a}{T} = \frac{\varepsilon t_c}{T} = \varepsilon \cdot k_1,$$

$$\frac{t_0}{T_0} = \frac{t_s - t_a}{T_0} = \frac{t_s}{T_0} (1 - \varepsilon) = k_s (1 - \varepsilon),$$

$$\frac{t_a}{T} + \frac{t_0}{T_0} = \varepsilon k_1 + k_s - k_s \varepsilon = k_1 \left(\varepsilon + \frac{k_s}{k_1} - \varepsilon \frac{k_s}{k_1} \right) = k_1 (\varepsilon + \beta - \beta \varepsilon),$$

то последнее уравнение можно переписать в следующем виде:

$$\tau_m (1 - e^{-\varepsilon k_1}) = \tau_2 (1 - e^{-k_1 (\varepsilon + \beta - \beta \varepsilon)}).$$

Отсюда термический коэффициент перегрузки p_w :

$$p_w = \frac{\tau_m}{\tau_2} = \frac{1 - e^{k_1 (\varepsilon + \beta - \beta \varepsilon)}}{1 - e^{k_1 \varepsilon}}. \quad (282)$$

На фиг. 304 в виде кривых представлена зависимость p_w от k_1 , для $\beta = 0,5$ при значениях $\varepsilon = 0,15; 0,25; 0,35; 0,5$ и 1 .

На фиг. 305 нанесены те же кривые для случая $\beta = 1$. Значение $\beta = 1$ имеет место для электрических механизмов, не имеющих движущихся частей, каковы: трансформаторы, реостаты, дроссель-

ные катушки, статические конденсаторы. В том и другом случае кривые, пересекая ось ординат, дают значение p_{w0} , для которых $k_1 = 0$. Непосредственная подстановка $k_1 = 0$ в ур-ние (282) дает $p = \frac{0}{0}$, т. е. неопределенность. По известному правилу l'Hôpital, получаем:

$$p_{w0} = \frac{\varepsilon - \beta\varepsilon + \beta}{\varepsilon} = \frac{\beta}{\varepsilon} + (1 - \beta). \quad (282')$$

Для значений $k_1 = \infty$ кривые асимптотически приближаются к единице.

Если заменить построенные нами кривые линии прямыми, то для

произвольных значений k_1 , не превышающих единицы, можно с некоторым приближением считать:

$$\frac{p_{w1}}{p_{w0}} \approx \frac{p_{w1}}{p_{w0}} = \frac{\frac{\beta}{\varepsilon_1} + (1 - \beta)}{\frac{\beta}{\varepsilon_2} + (1 - \beta)},$$

откуда

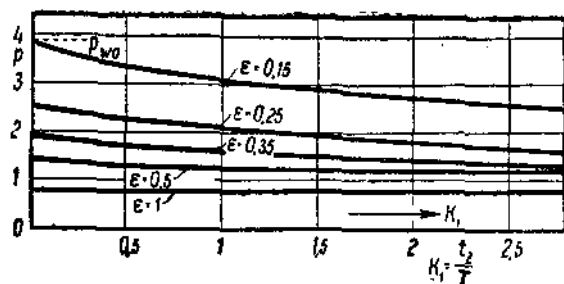
$$p_{w1} = p_{w0} \cdot \frac{\frac{\beta}{\varepsilon_2} + (1 - \beta)}{\frac{\beta}{\varepsilon_1} + 1 - \beta}. \quad (283)$$

Таким образом, зная термический коэффициент перегрузки для какого-либо одного значения ε_1 , можно вычислить его и для всякого другого значения ε_2 по формуле (283), которая в практических расчетах,

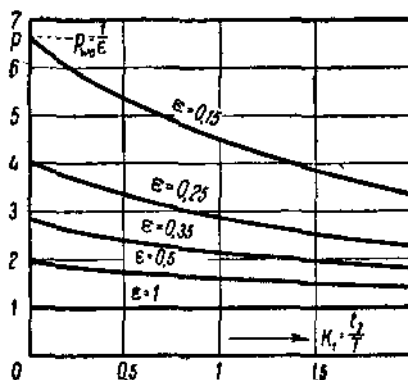
где k_1 обычно не превышает $\frac{1}{7} - \frac{1}{10}$, дает достаточно точные результаты.

а) Упрощенный аналитический способ. Если в целях дальнейшего упрощения предыдущих выражений принять $T =$

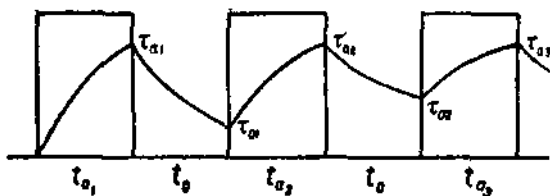
$= \text{const}$ для всех периодов цикла прерывистой работы, то предлагаемый ниже метод аналитического нахождения прерывистой



Фиг. 304.



Фиг. 305.



Фиг. 306.

точности и термического и механического коэффициентов перегрузки становится настолько прост, что им можно пользоваться практически.

Действительно, принимая начальную температуру $\tau_0 = 0$, имеем соответственно фиг. 306 (где $t_{a_1} = t_{a_2} = t_{a_3} = t_a$):

$$\begin{aligned}\tau_{a_1} &= \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_{a_1}}{T}} \right); \\ \tau_{a_2} &= \tau_{a_1} e^{-\frac{t_0}{T}} = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \cdot e^{-\frac{t_0}{T}}; \\ \tau_{a_2} &= \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) + \tau_{a_1} e^{-\frac{t_a}{T}} = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) + \\ &+ \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) e^{-\frac{t_a}{T}} e^{-\frac{t_0}{T}} = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \left(1 + e^{-\frac{t_a + t_0}{T}} \right); \\ \tau_{a_3} &= \tau_{a_2} e^{-\frac{t_0}{T}} = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \left(1 + e^{-\frac{t_a + t_0}{T}} \right) e^{-\frac{t_0}{T}}; \\ \tau_{a_3} &= \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) + \tau_{a_2} e^{-\frac{t_a}{T}} = \\ &= \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \left(1 + e^{-\frac{t_a + t_0}{T}} + e^{-\frac{2(t_a + t_0)}{T}} \right); \\ \tau_{am} &= \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \left(1 + e^{-\frac{t_a + t_0}{T}} + e^{-\frac{2(t_a + t_0)}{T}} + \dots + \right. \\ &\quad \left. + \dots + e^{-\frac{(m-1)(t_a + t_0)}{T}} \right) = \\ &= \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \left(1 - e^{-k} + e^{-2k} + \dots + e^{-(m-1)k} \right); \\ \tau_{om} &= \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \left(1 + e^{-k} + e^{-2k} + \dots + e^{-(m-1)k} \right) e^{-\frac{t_0}{T}}.\end{aligned}$$

Преобразовывая ряд, заключенный в квадратные скобки

$$1 + e^{-k} + e^{-2k} + \dots + e^{-(m-1)k} = \frac{e^{-mk} - 1}{e^{-k} - 1},$$

и подставляя в предыдущие уравнения, получаем:

$$\begin{aligned}\tau_{am} &= \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \frac{e^{-mk} - 1}{e^{-k} - 1} = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \frac{1 - e^{-mk}}{1 - e^{-k}}; \\ \tau_{om} &= \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \frac{e^{-mk} - 1}{e^{-k} - 1} e^{-\frac{t_0}{T}} = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \frac{1 - e^{-mk}}{1 - e^{-k}} e^{-\frac{t_0}{T}}.\end{aligned}$$

Вводя еще значение $\varepsilon = \frac{t_a}{t_a + t_0}$ или $t_a + t_0 = \frac{t_a}{\varepsilon}$, получаем предыдущее уравнение в виде:

$$\tau_{am} = \tau_n \frac{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{\varepsilon T}}} \left(1 - e^{-\frac{mT}{\varepsilon T}} \right) \quad (284)$$

Отсюда можно определить, следовательно, температуру двигателя после m -го цикла прерывистой работы.

Вместе с тем уравнение (284) дает ту температуру

$$\tau_n \frac{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{\varepsilon T}}},$$

к которой двигатель асимптотически приближается и которая, очевидно, меньше τ_n , а отсюда определяется и термический коэффициент перегрузки двигателя данной длительной мощности, если его пустить на прерывистую работу данного режима t_a и ε :

$$p_w = \frac{\tau_n \frac{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{\varepsilon T}}}}{\tau_n \frac{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{\varepsilon T}}}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_a}{\varepsilon T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}}. \quad (285)$$

Преобразовывая последнее уравнение, определяем коэффициент включения ε :

$$p_w \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) = 1 - e^{-\frac{t_a}{\varepsilon T}};$$

$$-\frac{t_a}{\varepsilon T} = \ln \left[1 - p_w \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \right]$$

или:

$$\varepsilon = - \frac{t_a}{T \cdot \ln \left[1 - p_w \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) \right]} = - \frac{t_a}{T \cdot \ln \left(\frac{e^{\frac{t_a}{T}} - p_w e^{\frac{t_a}{T}} + p_w}{e^{\frac{t_a}{T}}} \right)} =$$

$$\frac{1}{\frac{T}{t_a} \ln \left[p_w + (1 - p_w) e^{\frac{t_a}{T}} \right] - \frac{T}{t_a} \ln e^{\frac{t_a}{T}}} = \frac{1}{1 - \frac{T}{t_a} \ln \left[p_w - (p_w - 1) e^{-\frac{t_a}{T}} \right]} \quad (286)$$

т. е. упрощенное выражение Oelschlager'a.

Пользуясь тем же ур-нием (284), можно ответить на встречающийся иногда в практике вопрос, после какого числа m циклов работы двигатель данной длительной мощности P_D и, следовательно, данных потерь при нормальной нагрузке W_n достигнет температуры τ_{am} при данном режиме прерывистой работы ϵ .

Преобразовывая ур-ние (284), имеем:

$$1 - e^{-\frac{mt_a}{\epsilon T}} = \frac{\tau_{am} \left(1 - e^{-\frac{t_a}{\epsilon T}} \right)}{\tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right)} = \frac{\tau_{am} \left(1 - e^{-\frac{t_a}{\epsilon T}} \right)}{\frac{W_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right)};$$

$$e^{-\frac{mt_a}{\epsilon T}} = 1 + \frac{\tau_{am} \left(e^{-\frac{t_a}{\epsilon T}} - 1 \right)}{\tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right)}$$

или

$$e^{\frac{mt_a}{\epsilon T}} = \frac{\tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right)}{\tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) + \tau_{am} \left(e^{-\frac{t_a}{\epsilon T}} - 1 \right)},$$

откуда:

$$m = \frac{\epsilon T}{t_a} \ln \left[\frac{\tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right)}{\tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) + \tau_{am} \left(e^{-\frac{t_a}{\epsilon T}} - 1 \right)} \right] =$$

$$= \frac{T}{t_a + t_0} \ln \left[\frac{\frac{W_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right)}{\frac{W_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \right) + \tau_{am} \left(e^{-\frac{t_a}{\epsilon T}} - 1 \right)} \right] \quad (287)$$

На фиг. 307 пучок кривых соответствует уравнению Oelschlager'a и дает зависимость p_w от $\epsilon = \frac{t_a}{t_s} = \frac{t_a}{t_a + t_0}$ для прерывистой работы, причем $\frac{t_a}{T}$ является параметром.

По оси абсцисс отложено отношение $\frac{t_a}{t_s}$, т. е. обозначенное выше через ε отношение периода работы к полному циклу (работы плюс паузы).

Из этой зависимости *) мы опять видим в высшей степени важную роль, которую играет постоянная времени T в процессе изучения различных условий работы двигателя, а именно: знание одной этой постоянной T двигателя достаточно для того, чтобы из пучка кривых для произвольно взятых условий нагрузки получить допустимую величину перегрузки p_w для данных условий.

Так, положим, что нам известны следующие значения: $T = 60$ мин.; $t_a = t_0 = 6$ мин; тогда $\varepsilon = \frac{t_a}{t_s} = 0,5$ и параметр

$$\frac{t_a}{T} = \frac{6}{60} = 0,1.$$

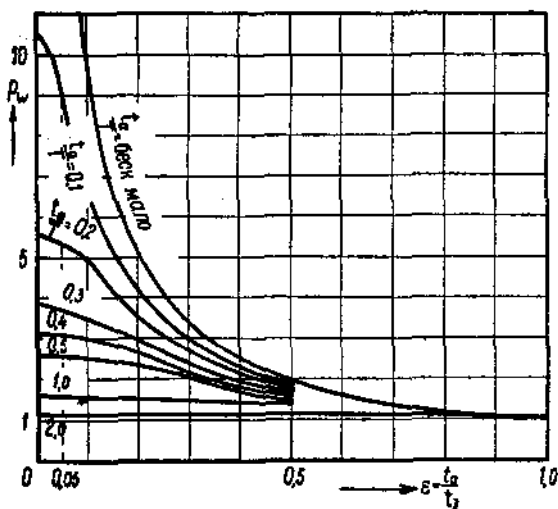
Из кривых фиг. 307 находим $p_w = 2$. Если бы t_0 равнялось 114 мин., а $\varepsilon = \frac{6}{6 + 114} = 0,05$, то $p_w = 9$. Это значит, что при дан-

*) Необходимо оговорить, что различие между T и T_0 для вращающегося и неподвижного двигателя создает дальнейшую зависимость для коэффициента перегрузки p_w .

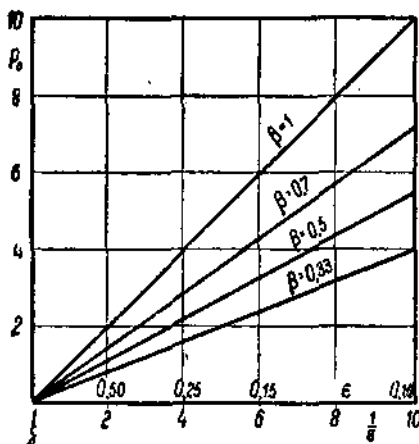
Г. Влас (Е. Т. З., 1920, Н. 20) приводит целый ряд пучков кривых, составленных для различных отношений $\beta = \frac{T}{T_0}$. Зависимость

p_w от ε при параметре $\beta = \frac{T}{T_0}$ представляется кривыми гиперболического вида. Можно, однако, представить ее в более удобной для практики форме прямолинейной зависимости, если вместо ε ввести обратную величину $\frac{1}{\varepsilon}$, как это сделано на фиг. 308 для

четырех наиболее ходовых значений коэффициента β : $\beta = 1,0$ для трансформатора, реостата и тому подобной не вращающейся аппаратуры; $\beta = 0,7$ — для закрытых электродвигателей; $\beta = 0,5$ — для открытых электродвигателей без искусственного охлаждения; $\beta = 0,33$ — для открытых двигателей с искусственной вентиляцией.



Фиг. 307.



Фиг. 308.

ных условиях работы двигатель мог бы, не перегреваясь, выдерживать трехкратный нормальный ток (см. далее ур-ние 288').

При проектировании электрического привода обычно имеет место несколько иная постановка вопроса: дается нагрузка P_1 , а также значения t_a и t_0 ; требуется же найти подходящий двигатель. В таком случае подбирают его по каталогу приблизительно; если при этом постоянная времени T известна, то из пучка кривых по величине $\frac{t_a}{T}$ и ϵ определяют значение p_w и рассчитывают затем нормальную мощность, которая должна при удачном подборе мотора соответствовать его мощности из каталога. Однако не всегда имеются надежные данные относительно T ; впрочем, тогда по большей части можно получить от завода допустимое значение p_w для определенного рода работы — кратковременной или прерывистой.

Весьма интересно найти зависимость между термическим коэффициентом перегрузки p_w , и механическим коэффициентом перегрузки p_m , определяя последний как отношение прерывистой мощности с данными значениями t_1 и ϵ к продолжительной мощности (без перерывов в работе).

Как*выше было выяснено, между потерями двигателя и его нагрузкой может быть установлено соотношение:

$$W = k + v \cdot x^2 = k + \frac{k}{\alpha} x^2 = k + \gamma P_m^2,$$

где k — постоянные потери двигателя, не зависящие от нагрузки (при холостом ходе); v — переменные потери двигателя при номинальной нагрузке; x — отношение данной нагрузки к номинальной;

$\alpha = \frac{k}{v}$ — отношение постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке; P_m — механическая мощность двигателя; $P_{ном}$ — номинальная механическая мощность двигателя.

Деля обе части последнего равенства на P_m , получим:

$$\frac{W}{P_m} = \frac{k}{P_m} + \gamma P_m = \frac{1 - \eta}{\eta},$$

причем к. п. д. двигателя

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + W} = \frac{1}{1 + \frac{W}{P_m}}.$$

Отмечая индексом D мощность и потери при длительной непрерывной нагрузке, а индексом e — при длительной прерывистой нагрузке и опуская для простоты значок m у P , получим:

$$W_e = k + \gamma P_e^2,$$

$$W_D = k + \gamma P_D^2.$$

Так как

$$\tau_m = \frac{W_e}{A} \text{ и } \tau_n = \frac{W_D}{A},$$

то

$$p_w = \frac{\tau_m}{\tau_n} = \frac{W_s}{W_D} = \frac{k + \gamma P_s^2}{k + \gamma P_D^2} = \frac{\frac{k}{\gamma P_D^2} + \left(\frac{P_s}{P_D}\right)^2}{\frac{k}{\gamma P_D^2} + 1} = \frac{\frac{k}{\gamma} + p_m^2}{\frac{k}{\gamma} + 1} = \frac{\alpha + p_m^2}{\alpha + 1}$$

или

$$p_m^2 = p_w + \alpha (p_w - 1),$$

откуда

$$p_m = \sqrt{p_w + \alpha (p_w - 1)} \quad (288)$$

Ур-ние (288) было найдено в предположении, что как постоянные, так и переменные потери двигателя одинаковы при непрерывной и прерывистой работе. Если же они различны, то для общих потерь двигателя будем иметь соотношения:

$$W_s = k_s + \gamma_s \cdot P_s^2 \text{ и } W_D = k_D + \gamma_D \cdot P_D^2,$$

откуда

$$p_w = \frac{\tau_m}{\tau_n} = \frac{W_s}{W_D} = \frac{k_s + \gamma_s P_s^2}{k_D + \gamma_D P_D^2} = \frac{\gamma_s \cdot P_s^2 \left(\frac{k_s}{\gamma_s \cdot P_s^2} + 1 \right)}{\gamma_D \cdot P_D^2 \left(\frac{k_D}{\gamma_D \cdot P_D^2} + 1 \right)} = \frac{\gamma_s}{\gamma_D} \cdot p_m^2 \frac{\alpha_s + 1}{\alpha_D + 1},$$

т. е.

$$p_m = \sqrt{p_w \frac{\gamma_D (\alpha_D + 1)}{\gamma_s (\alpha_s + 1)}}. \quad (288')$$

При условии

$$\gamma_D (\alpha_D + 1) = \gamma_s (\alpha_s + 1)$$

очевидно:

$$p_m = \sqrt{p_w} \quad (288'')$$

Итак ур-ниями (288) и (288'') разрешается в общем виде вопрос об определении зависимости между термическим и механическим коэффициентами перегрузки электродвигателя при прерывистой работе.

Считаем лишним останавливаться здесь на дальнейшей математической обработке рассматриваемого вопроса. Интересующимся ею можно указать статью F. Blanc, E. T. Z., 1922, стр. 176 и 216.

б) Графический способ. Для графического нахождения нагревания двигателя при прерывистой работе пользуются вышеуказанным законом, по которому кривые нагревания получаются передвижением соответствующего лекала, построенного по логарифмической кривой для данной величины T .

На фиг. 309 представлено такое построение. Пусть W_k означает количество тепла, развиваемого в двигателе при какой-либо мощности P_k .

Подбираем предварительно двигатель какой-нибудь номинальной продолжительной мощности P_n , при которой в нем будет развиваться количество тепла W_n . Так как конечная температура τ_n пропорциональна W_n , то на ординате можно нанести также и τ_n в соответствующем масштабе °C. Теперь найдем вид температурной кривой двигателя при нагрузке P_k .

Если бы количество тепла W_k , соответствующее этой кратковременной мощности P_k , развивалось в двигателе продолжительно, то последний достиг бы некоторой конечной температуры τ_k , соответствующей W_k в том же масштабе. Лекало передвигается так, чтобы горизонтальная часть его была параллельна оси абсцисс и чтобы кривая нагрева из точки O асимптотически подошла к прямой, проведенной через τ_k параллельно оси абсцисс. Однако в действительности такое течение кривой имеет место лишь до момента времени t_1 , достигая при этом значения τ_1 ; в это мгновение нагрузка становится равной нулю.

Если бы двигатель был отключен продолжительно, то температура его дошла бы до нуля, т. е., вернее, до температуры окружающей среды, принимаемой за нуль. Кривую охлаждения можно опять получить посредством шаблона, а именно (предполагая пока величину T неизменной) повернув его на 180° и прикладывая так, чтобы кривая, проходя через точку τ_1 , асимптотически приближалась к оси абсцисс и горизонтальной частью шаблона совпала с нею.

Так как в момент t_2 опять начинает развиваться количество тепла W_k при нагрузке P_k , то температура опять будет расти от полученного значения τ_2 до значения τ_k (в бесконечности). Кривую этого роста и здесь можно получить с помощью лекала (шаблона), ведя ее через точки τ_2 и τ_k .

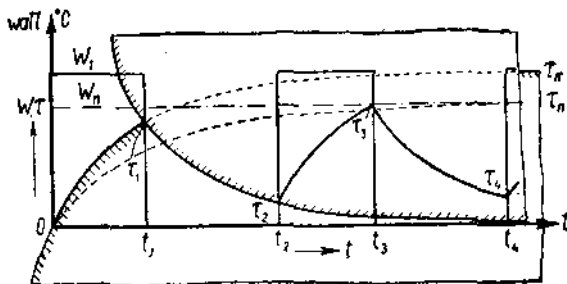
Таким образом построение продолжается до тех пор, пока температурные колебания не сделаются идентичными, что укажет на установившееся состояние. Пики температурных кривых не должны превышать нормальную температуру τ_n .

Однако, как уже было отмечено, постоянная времени T вращающегося двигателя иная, чем неподвижного. При графическом построении учесть это не представляет трудности, а именно: для кривой охлаждения (пауз) берем другое лекало, соответствующее значению T_0 для неподвижного ротора. Можно было и здесь применить то же самое лекало, но зато укоротить паузы в отношении

постоянных времени $\frac{T}{T_0}$.

Выше были приведены значения отношения $\beta = \frac{T}{T_0}$ для различного типа машин завода Сименс-Шуккерт.

Кроме того на величину удельной теплоотдачи μ , а следовательно на

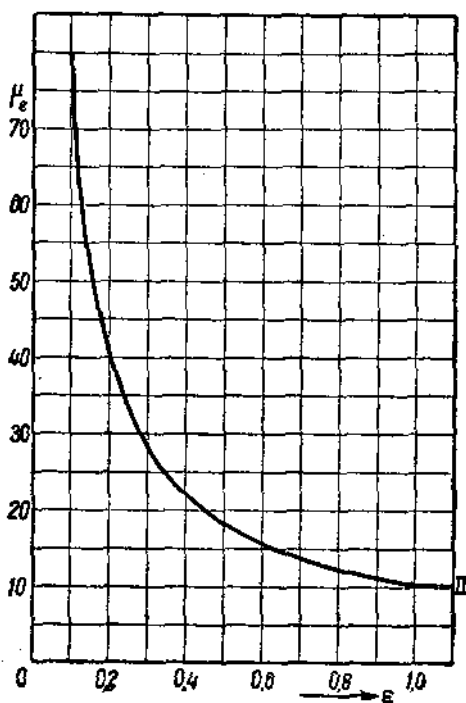


Фиг. 309.

A и T , влияет и самая величина ϵ . По данным инж. Лившица (Е.Т.З., 1926, Н. 46) отношение μ_e при прерывистой работе к μ_D при длительной можно выразить уравнением:

$$\mu_{w_0} = \frac{\mu_e}{\mu_D} = \frac{\beta}{\epsilon} - \beta + 1 \quad (289)$$

или кривой (фиг. 310), где, при $\epsilon = 1$, $\mu_e = \mu_D = 11 - \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$.



Фиг. 310.

При рабочих диаграммах второго рода, т. е. с произвольной и неправильной формой изменения нагрузки, как это представлено на фиг. 311, графическое нахождение температурной кривой почти также просто, как и для первого случая. Здесь мы только заменяем по известному правилу плавную кривую ступенеобразной. Соответственным передвижением лекала, построенного для определенного значения постоянной времени T предварительно подобранного двигателя, мы и тут могли бы по предыдущему найти температурную кривую.

Однако, хотя этот графический метод и достаточно прост, приведем здесь другой, тоже графический и основанный на известном уже из главы I принципе пропорций.

Перепишем ур-ние (271)

$$W = C \frac{d\tau}{dt} + A\tau$$

в виде пропорции:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{W - A\tau}{C} \quad (271')$$

Если в начальный момент времени $t=0$ двигатель стоит холодный, то $\tau=0$, и пропорция примет простой вид:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{W}{C}.$$

Предполагая величину C постоянной, отложим ее на фиг. 311 по оси абсцисс влево от начала координат в виде отрезка OC в произвольном масштабе (о выборе других масштабов см. далее).

Однако уже из сделанного грубо приближенного построения видно, что первоначальная ошибка будет не очень велика, если отрезок OD_1 выбрать не очень большим. Вообще же говоря, и стремиться к большой точности при построении нет оснований в виду того, что самые исходные положения правильны только приблизительно.

Определяя рост температуры для следующего элемента времени dt_2 , подставляем в ур-ние (271) среднее значение $\tau_{m2} = \frac{D_2 E_2}{2}$. Развиваемое при этом количество тепла равно теперь некоторой величине W_2 . Вычитаем из значения W_2 величину $A\tau_{m2}$ и получаем соответствующий участок OB_2 . Повторяя вышеизложенное построение, найдем отрезок $E_1'E_2$ для дальнейшего роста температуры.

Итак, по истечении времени $dt_1 + dt_2$ имеем превышение температуры $d\tau_1 + d\tau_2$. Удобнее всего наносить их непосредственно вправо от начала координат O в функции времени t , проводя OE'_1 параллельно CB'_1 , а затем из полученной точки — линию, параллельную CB_2 .

Так как на оси ординат наносятся температуры, то для нахождения величины $A\tau$ можно было бы применить следующее построение: проведем через точку O прямую OG под углом α к оси ординат, который определяется из условия: $\lg \alpha = A$.

Тогда очевидно:

$$G_1 F_1 = OF_1 \lg \alpha = A\tau,$$

где

$$OF_1 = \frac{D_1 E_1}{2}$$

и, следовательно,

$$OB'_1 = OB_1 - F_1 G_1.$$

Чтобы получить цифровой результат, надо выбрать масштабы. Для единицы $C \left(\frac{W \text{ sec}}{^\circ C} \right)$ выбираем, например, $m_c \text{ mpm}$, тогда: $OC = m \cdot C \text{ mpm}$; для потерь W (ватты) берем: $m_w \text{ mpm}$; наконец, для времени t берем масштаб: $1 \text{ sec} = m_t \text{ mpm}$; этим мы предопределяем масштаб для значений τ :

$$m_\tau = \frac{m_w \cdot m_t}{m_c} \left(\frac{W \cdot \text{sec}}{^\circ C} \right).$$

Относительно нахождения величины двигателя имеет место сказанное выше; расчет его не будет очень затруднен, если предположить, что T меняется.

Кривая $\tau = f(t)$ представляет изменение температуры. Построение ее следует продолжать до тех пор, пока колебания температуры не начнут повторяться, что укажет на установившееся состояние. Чтобы не удлиннять диаграммы, можно, доведя ее до точки E_n , конца первого периода, строить опять от оси ординат (от точки E_x). Из хода кривой видно, что наивысшая установившаяся температура равняется τ_m . Если мотор выбран правильно,

то должно быть справедливо равенство $\tau_m = \tau_n$. Кривая k_m представляет кривую нагревания для случая длительной работы с нормальной мощностью. Если учесть нагрев двигателя лишь средним арифметическим значением W_m различных количеств теплоты $W_1, W_2, \dots$, выделяемых в разные элементы времени, то получили бы некоторую другую кривую k_m и соответственно τ_m . Однако в сколько-нибудь ответственных случаях недопустимо выбирать электродвигатель, руководствуясь только средним значением W_m количеств тепла или потерь.

На фиг. 311 приведен еще один способ приблизительного построения кривой нагрева. Именно рост температуры, например за элемент времени dt_2 , от точки E_1' до E_2 можно найти, если от точки W_2' , соответствующей τ_{n2} , отложить участок, равный T , и соединить конец его с точкой E_1' ; линия соединения и укажет искомый рост температуры за время dt_2 . На доказательстве этого не будем останавливаться, тем более что оно должно быть понятно из предыдущих построений.

Обратимся теперь к вопросу о приведении в какое-либо соотношение введенных в практику терминов оценки мощности электродвигателей. Необходимость этого соотношения чувствуется остро, потому что каждый из терминов является незаменимым в определенных условиях: так, термины кратковременной и длительной мощности оказываются весьма удобными для заводов в отношении приемочных испытаний, но менее конкретными в применении к проектированию электрического привода с прерывистой нагрузкой. Между тем, термин „прерывистой мощности“, определяющий способность двигателя выдержать работу при строго установленном режиме, представляет значительные трудности в отношении проверки такой мощности на приемочных испытаниях. Действительно, помимо затруднительности в обстановке испытательного отделения завода воспроизвести в точности условия будущей работы двигателя даже в случае правильной повторно-кратковременной работы, такое испытание является чрезвычайно длительным.

Естественно поэтому возникло предложение заменить его испытанием на непрерывную нагрузку, соответствующую данной прерывистой мощности, обусловив заранее время, в течение которого двигатель нагреется до той же нормальной температуры τ_n , что и при действительной прерывистой работе. Это время, обозначенное на фиг. 312 буквой H , предложено назвать временем эквивалентной оценки мощности двигателя (Bewertungszeit). Таким образом временем H устанавливается и необходимая связь между прерывистой мощностью и кратковременной, но, конечно, не с одной из узаконенных нормами пяти-шести мощностей (15, 30, 45, 60 и 90-минутной), а с такой, которая получится из опыта или аналитически.

В соответствии с введенным понятием о времени эквивалентной оценки H можно написать:

$$\tau_2 = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{H}{T}} \right)$$

или по ур-нию (282):

$$\frac{\tau_m}{\tau_2} = p_w = \frac{1}{1 - e^{-\frac{H}{T}}} = \frac{1 - e^{-k_1(\alpha - \beta + \beta)}}{1 - e^{-k_1 \cdot \alpha}}$$

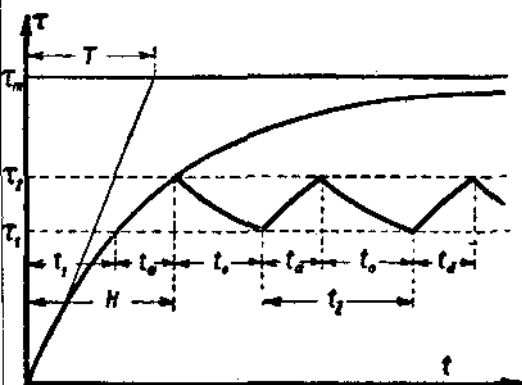
откуда

$$1 - e^{-\frac{H}{T}} = \frac{1 - e^{-k_1 s}}{1 - e^{-k_1 (s - \beta s + s)}}$$

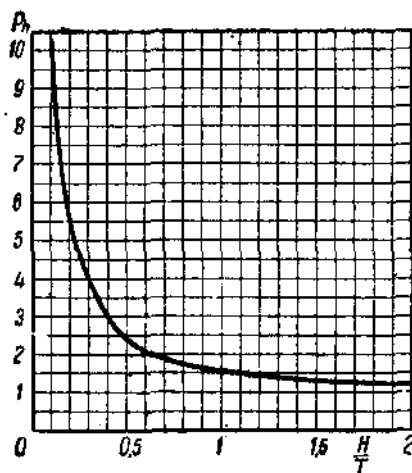
и, следовательно,

$$H = -T \ln \frac{e^{-k_1 s} - e^{-k_1 (\beta s + s)}}{1 - e^{-k_1 (\beta s + s)}}. \quad (290)$$

На фиг. 313 в виде кривой представлена зависимость p от отношения $\frac{H}{T}$ согласно ур-нию (282), а на фиг. 314а по ур-нию (290) дана зависимость $\frac{H}{T}$ от k_1 при $\beta = \frac{1}{2}$ для четырех значений $\epsilon = 0,5 - 0,35 - 0,25 - 0,15$. На фиг. 314б нанесены те же кривые для значения $\beta = 1$. Точки пересече-



Фиг. 312.



Фиг. 313.

чения кривых с осью ординат дают значение $\frac{H}{T}$ для $k_1 = 0$. Определяя значения H_0 , отвечающие $k_1 = 0$, по правилу Лопиталья из ур-ния (290), находим:

$$H_0 = -T \ln \frac{1 - \epsilon}{1 - \epsilon + \frac{\epsilon}{\beta}}, \quad (291)$$

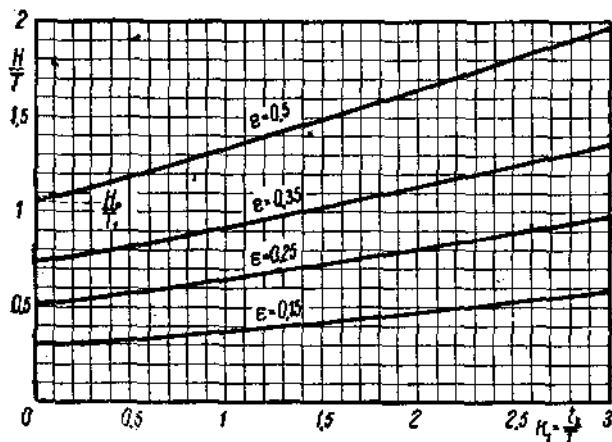
Так как для небольших численных значений k_1 кривые фиг. 314а и 314б могут быть заменены прямыми линиями, то для указанных значений k_1 можно принять:

$$\frac{H_{\epsilon_1}}{H_{\epsilon_2}} \cong \frac{H_{0\epsilon_1}}{H_{0\epsilon_2}} = \frac{\ln \frac{1 - \epsilon_1}{1 - \epsilon_1 + \frac{\epsilon_1}{\beta}}}{\ln \frac{1 - \epsilon_2}{1 - \epsilon_2 + \frac{\epsilon_2}{\beta}}}$$

откуда:

$$H_{*1} \cong H_{*1} \frac{\ln \frac{1 - \varepsilon_2}{1 - \varepsilon_2 + \frac{\varepsilon_2}{\beta}}}{\ln \frac{1 - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_1}{\beta}}}, \quad (292)$$

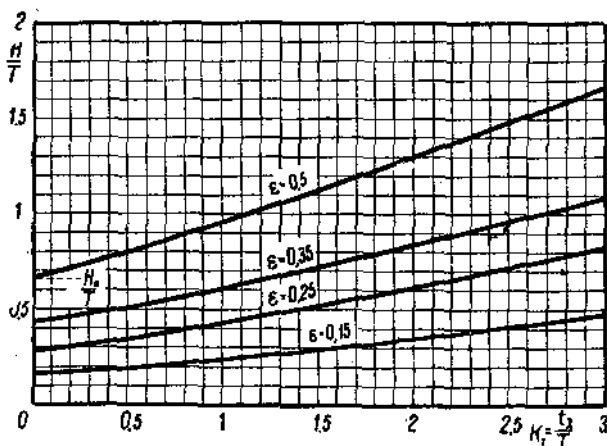
т. е., зная величину H для какого-нибудь одного режима $\varepsilon = \varepsilon_1$, можно вычислить значение H для всякого другого режима $\varepsilon = \varepsilon_2$ по прибли-



Фиг. 314 а.

женной формуле (292), которая дает тем более точные значения, чем меньше величина k_1 .

В табл. 67 сведены значения $\frac{H}{H_{*1=0.25}}$ для различных ε и β .



Фиг. 314 б.

ТАБЛИЦА 67.

$\beta \backslash \epsilon$	$\epsilon = 0,15$	0,25	0,35	0,50
0,5	0,59	1	1,41	2,16
1,0	0,57	1	1,51	2,42

Полученные ур-ния (290) и (291) могут быть представлены еще в следующем виде:

$$H = -T \ln \frac{(1 - e^{-k_1(\epsilon - \beta\epsilon + \beta)}) - (1 - e^{-\epsilon k_1})}{1 - e^{-k_1(\epsilon - \beta\epsilon + \beta)}} = -T \ln \left(1 - \frac{1}{p_w} \right) \quad (290'')$$

и точно так же:

$$H_0 = -T \ln \frac{\left(1 - \epsilon + \frac{\epsilon}{\beta} \right) - \frac{\epsilon}{\beta}}{1 - \epsilon + \frac{\epsilon}{\beta}} = -T \ln \left(1 - \frac{1}{p_{w0}} \right) \quad (291'')$$

или, разлагая $\ln(1 - p_w)$ в ряд, получим:

$$H = +T \left[\frac{1}{p_w} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{p_w} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{p_w} \right)^3 + \dots \right].$$

Пренебрегая членами ряда степени выше второй, получим:

$$p_w = \frac{1}{\sqrt{2 \frac{H_0}{T} + 1} - 1}. \quad (290''')$$

Так как всегда $p_w > 0$, то знак минус перед радикалом отбрасываем.

Точно так же для $k_1 = 0$ получим:

$$p_{w0} = \frac{1}{\sqrt{2 \frac{H}{T} + 1} - 1}. \quad (291''')$$

Ур-ния (290''') и (291''') дают зависимость p от H в алгебраической форме, в противоположность ур-ниям (290') и (291'), которые дают эту зависимость в форме трансцендентной.

Как уже указывалось, для небольших численных значений k_1 кривые фиг. 304 и 305 могут быть заменены прямыми вида:

$$p_w = p_{w0} - S_1 \frac{t_2}{T},$$

где S_1 — некоторый численный коэффициент.

С другой стороны, заменяя кривые фиг. 314а и 314б прямыми линиями, найдем:

$$\frac{H}{T} = \frac{H_0}{T} + S_2 \frac{t_z}{T},$$

где S_2 — другой численный коэффициент.

Исключив из двух последних соотношений $k_1 = \frac{t_z}{T}$, найдем:

$$p_w = p_{w0} - \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{H - H_0}{T}.$$

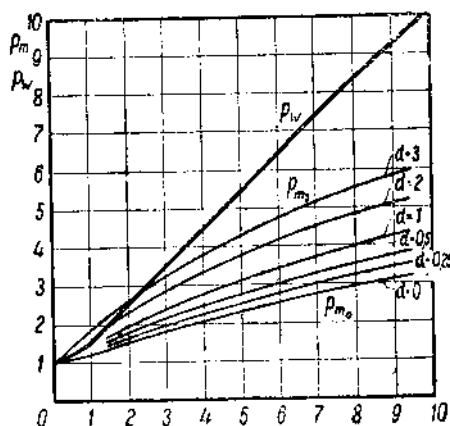
Определяя для данного значения β коэффициент S_1 и S_2 и заменяя затем p_{w0} и H_0 по ур-нию (291") и (289) их выражениями через β и ϵ , получим из последнего уравнения зависимость p_w от β , ϵ , H и T . Подставив затем найденное таким образом значение p_w в ур-ние (288), будем иметь соотношение между p_w и β , ϵ , α , H и T в виде чисто алгебраического уравнения. На фиг. 315 даны кривые зависимости p_w и p_m от отношения $\frac{T}{H}$. Заметим, что в случае,

если потери холостого хода двигателя малы и можно положить $\alpha = 0$, то ур-ние (288) дает:

$$p_m \cong \sqrt{p_w}, \quad (288'')$$

откуда для $k_1 = 0$ получаем:

$$p_{m0} \cong \sqrt{p_{w0}} = \sqrt{\frac{\beta}{\epsilon} + (1 - \beta)}.$$



Фиг. 315.

§ 7. Способ среднего квадратичного тока.

Таким образом для целей практики приходится искать других способов, более примитивных, грубых, но простых в применении. Такие способы имеются, и в последнее время их предложено значительное количество; из них ниже коснемся наиболее характерных.

Как первый приведем известный метод определения мощности по так называемому среднему квадратичному, эквивалентному или эффективному току. Как показывает само название, способ этот требует построения диаграммы потребляемого двигателем тока в функции времени. Такая диаграмма может быть получена из диаграммы силы тяги или момента на валу двигателя, если имеются необходимые характеристики (зависимость M/i и др.) для двигателя, предварительно ориентировочно намеченного.

Само собой разумеется, что если способ основан на учете нагревания, пропорционального квадрату силы тока, то, следовательно, он не учитывает нагревания, не зависящего от тока, т. е. порождаемого постоянными потерями.

Такое допущение базируется на том, что наиболее уязвимой в отношении нагрева частью электродвигателя являются его обмотки. Действительно, во-первых, наибольшее количество тепла при работе электродвигателя выделяется именно в его обмотках, а во-вторых, и самое положение их является наиболее тяжелым с точки зрения теплоотдачи. Последнее в особенности относится к обмоткам, заложенным в роторе, от которых тепло отводится главным образом конвекцией. Объясняется это тем, что изоляция, окружающая несколькими слоями обмотку, значительно понижает роль теплопроводности, в то время как от железных частей ротора тепло, порождаемое постоянными потерями, отводится не только конвекцией, благодаря внутренней вентиляции, но и хорошей теплопроводностью железных частей, главным образом — вала. Несколько в лучших условиях находятся обмотки индукторных катушек как в отношении лучшей вентиляции, так и теплопроводности, благодаря непосредственному соприкосновению с более холодными железными частями сердечников и обода, но для средних частей относительно толстых индукторных катушек изоляция также сводит теплопроводность почти к нулю.

Учитывая таким образом только переменные потери, мы можем рассчитать тот эффективный или эквивалентный ток некоторой постоянной силы, который произвел бы нагревание электродвигателя, эквивалентное нагреванию от фактического, меняющегося по определенной диаграмме тока.

Пользуясь вышеприведенной теорией нагревания, обозначим опять развиваемые при различных нагрузках $P_1, P_2 \dots$ количества тепла через: $W_1, W_2 \dots$, а продолжительность их через $t_{a1}, t_{a2} \dots$. Тогда, очевидно, выражение для W_m представится:

$$W_m = \frac{W_1 \cdot t_{a1} + W_2 \cdot t_{a2} + \dots}{t_a + t_{a1} + \dots}$$

Так как тепло в обмотках является результатом теплового действия тока, то:

$$W = i^2 \cdot R$$

и, следовательно, средний квадратичный ток:

$$i_{m.q.} = \sqrt{\frac{i_1^2 t_{a1} + i_2^2 t_{a2} + \dots}{t_a + t_{a1} + \dots}} \quad (293)$$

причем под $t_{a1}, t_{a2} \dots$ могут подразумеваться и паузы.

Эта формула и представляет необходимое выражение для эквивалентного тока $i_{m.q.}$; оно тем более точно, чем меньше величины $t_a, t_{a2} \dots$ по сравнению с постоянной времени T .

Если, идя по пути уменьшения значения t_a , дойдем, наконец, до элементарно малых промежутков времени, то предыдущие уравнения примут вид:

$$W_m = \frac{\int W dt}{\Sigma t},$$

$$i_{m.q} = \sqrt{\frac{\int i^2 dt}{\Sigma t}}, \quad (293')$$

где Σt есть продолжительность всех периодов работы и паузы за рассматриваемый промежуток времени (например одну смену).

Итак, чтобы получить постоянный по величине эквивалентный ток электродвигателя $i_{m.q}$, который вызовет такое же нагревание в конце всего времени Σt , как и фактический, меняющийся ток, возводим в квадрат отдельные значения силы тока i и интегрируем полученные таким образом элементарные площадки: $f = i^2 dt$; затем делим интеграл на Σt и из полученного частного извлекаем квадратный корень.

Несомненно, что такое интегрирование можно произвести и графическим путем: т. е. по диаграмме i/t построить кривую квадратов тока в функции времени и найти ее площадь:

$$F = \int i^2 dt,$$

после чего эквивалентный ток определится по формуле (293') как:

$$i_{m.q} = \sqrt{\frac{F}{\Sigma t}}.$$

Если значение полученного тем или иным путем среднего квадратичного тока окажется близким и не выше значения нормального тока, соответствующего продолжительной мощности намеченного предварительно электродвигателя, то, очевидно, последний не перегреется при данной прерывистой работе и может быть оставлен окончательно.

Необходимо, однако, всегда помнить, применяя этот способ, что он учитывает лишь среднее нагревание эквивалентным током и, следовательно, не учитывает тех мгновенных температурных максимумов (пиков), которые дает предыдущий способ. (О поправке, предлагаемой в американских правилах для тяговых двигателей, будет сказано ниже (см. стр. 124 и 125), так же как и о том, что указанная недооценка будет тем меньше, чем больше постоянная T двигателя и чем меньше паузы.)

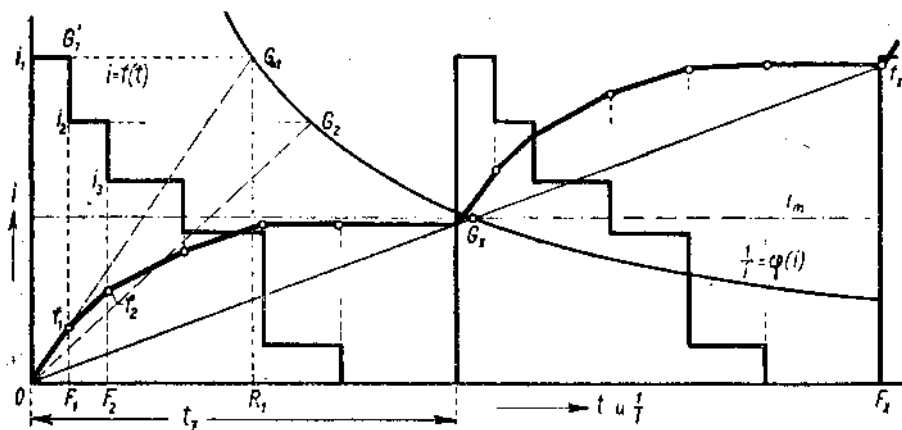
Вместо построения кривой квадратов тока и планиметрирования, может быть применен следующий графический способ нахождения $i_{m.q}$, предложенный проф. Швайгером и основанный на известном уже принципе пропорций.

Пусть диаграмма тока в функции времени определилась для данного привода в виде ступенчатой, как это представлено на фиг. 316; если диаграмма имеется в виде плавной кривой, то она может быть замещена ступенчатой по известному уже правилу.

Задача состоит в нахождении площадей $i^2 dt$, соответствующих отдельным ступеням диаграммы. Для первого элемента имеем: $f_1 = i_1^2 dt$, или, превращая это равенство в пропорцию:

$$\frac{i_1}{1} = \frac{f_1}{dt}.$$

Величина $\frac{1}{i}$ представляет здесь то, что в приведенном в главе I графическом способе построения диаграмм было названо масштабом уменьшения R .



Фиг. 316.

Однако в то время как там величина R была постоянной во все время построения, здесь отрезок OR надо менять соответственно значениям

$$\frac{1}{i_1}, \frac{1}{i_2} \dots$$

Итак, пусть на фиг. 316 представлена зависимость $i=f(t)$.

Наносим на оси абсцисс совершенно произвольный масштаб для $\frac{1}{i}$ и чертим кривую $\frac{1}{i}=\varphi(i)$. Чтобы получить ее, берем только несколько точек, например $i=10, 25, 50, 100$ А. Кривая представляет гиперболу. Теперь проектируем на нее высоту первой ступени и получаем таким образом точку G_1 . Соединяем ее с началом координат O и в пересечении прямой OG_1 с перпендикуляром к оси абсцисс $G_1'F_1$ находим точку f_1 .

Отрезок f_1F_1 есть мера для $i^2 dt$, так как

$$\frac{G_1R_1}{OR_1} = \frac{F_1f_1}{OF_1}$$

или

$$\frac{t_1}{i_1} = \frac{F_1f_1}{OF_1}; \quad F_1f_1 = i_1^2 \cdot OF = i_1^2 \cdot dt.$$

Далее проектируем вторую ступень i_2 на кривую $\frac{1}{i}$, получаем точку G_2 ; соединяем ее с O и проводим через f_1 линию, параллельную OG_2 ; пересечение этой линии с перпендикуляром в точке F_2 дает точку f_2 и определяет отрезок F_2f_2 , являющийся мерой: $i_1^2 dt + i_2^2 dt$.

Таким образом приводимое здесь построение принципиально подобно изложенному в главе I способу нахождения кривой пути из скоростной диаграммы; особенность лишь та, что отрезок OR является переменным.

Как конечную ординату второго порядка имеем отрезок $F_x f_x$, который в определенном масштабе представляет собой: $\int i^2 dt$; однако масштаб еще не известен.

Теперь, соединяя точки O и f_x , получаем в пересечении с кривой $\frac{1}{i}$ точку G_x . Проведенная через последнюю прямая, параллельная оси абсцисс, и дает линию эффективного тока $i_{m.q}$.

Правильность построения легко проверить: если бы ток $i_{m.q}$ фактически существовал в течение времени, определяемого отрезком OF_x , то прямая $F_x f_x$ явилась бы мерой произведения $i_{m.q}^2 \cdot OF_x$; по построению же отрезок

$F_x f_x$ есть мера значения $\int i^2 dt$; следовательно, $i_{m.q}$ есть не что иное как эквивалентный ток, который производит нагревание, эквивалентное нагреванию от фактического, меняющегося по величине тока.

Из построения эквивалентного тока для одного цикла работы двигателя понятно, что тот же путь применим и для всего рабочего времени, если диаграмма представляет собою правильное повторение одинаковых циклов.

§ 8. Способ средней квадратичной мощности.

В случае отсутствия необходимых характеристик M/i для намечаемого двигателя или отсутствия возможности снять диаграмму тока путем временной установки „калиброванного“ двигателя, можно прибегнуть к аналогичному методу средней квадратичной мощности.

Способ этот особенно удобен и прост там, где при подсчетах необходимой мощности двигателя удобнее иметь дело с полезной мощностью P_n на валу машины-орудия, чем с моментом, как, например, при проектировании электропривода станков. Полезная мощность, получаемая из сечения стружки и скорости резания (как произведение давления на резец и скорости резания), в сумме с потерями в станке представляет мощность на приводном валу. Надо однако заметить, что способ этот дает тем больше ошибки, чем более распределение потерь в двигателе отстает от выражаемого формулой *)

$$W = k + v \cdot x^2,$$

*) По подсчетам инж. В. Розенберга, для трехфазных двигателей S.S.W. и типа (DT) и (PRV) ВЭО потери выражаются с большой точностью этой формулой $W = k + v x^2$, причем:

$$k \cong \frac{30}{P_m} + 1,5, \quad v = 2k.$$

где $\dot{x} = \frac{P}{P_{\text{ном}}}$ — отношение мгновенной мощности на валу к номинальной мощности, k — постоянные потери, куда входят и омические потери холостого хода, v — переменные (омические) потери, за вычетом омических потерь холостого хода.

В общем же случае, понимая под k потери, не зависящие от тока, необходимо под выражением $x = \frac{P}{P_{\text{ном}}}$ подразумевать отношение подводимых из сети мощностей, т. е. мощностей на клеммах $x = \frac{P_{\text{кл}}}{P_{\text{ном. кл}}}$; иначе, при холостом ходе, когда полезная

мощность на валу равна нулю, выражение для потерь холостого хода $W_0 = k$ — явно неверно, так как и при холостом ходе некоторые омические (переменные) потери существовать будут.*)

Для точного подсчета мощности двигателей переменного тока надо выражать P в kVA, с учетом намагничивающего безваттного тока; и только тогда способ средней квадратичной мощности будет вполне эквивалентен способу среднеквадратичного тока. Но в таком виде оба одинаково неприменимы без знания характеристик M/i или кривых к. п. д. (и $\cos \varphi$, при переменном токе).

Нетрудно доказать точность этого способа (без учета постоянных потерь): соответственно выражению потерь $W = k + v \cdot x^2$ потери, соответствующие эквивалентной постоянной мощности $P_{\text{м.г}}$, можно выразить:

$$W_{\text{м.г}} = k + v \left(\frac{P_{\text{м.г}}}{P_{\text{ном}}} \right)^2.$$

С другой стороны, за весь период работы $\Sigma t = t_s$:

$$\begin{aligned} W_{\text{м.г}} &= \int \frac{W \cdot dt}{t_s} = \frac{\int \left[k + v \left(\frac{P}{P_{\text{ном}}} \right)^2 \right] dt}{t_s} = \frac{k \cdot t_s + \int v \left(\frac{P}{P_{\text{ном}}} \right)^2 dt}{t_s} = \\ &= k + \frac{v}{P_{\text{ном}}^2} \cdot \frac{\int P^2 dt}{t_s}. \end{aligned}$$

Отсюда, сравнивая оба выражения $W_{\text{м.г}}$:

$$k + v \cdot \left(\frac{P_{\text{м.г}}}{P_{\text{ном}}} \right)^2 = k + \frac{v}{P_{\text{ном}}^2} \cdot \int \frac{P^2 dt}{t_s}$$

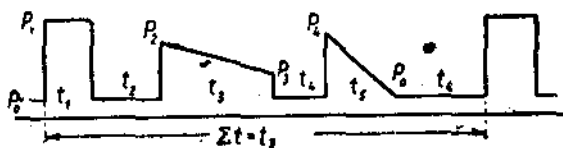
или

$$P_{\text{м.г}} = \sqrt{\frac{\int P^2 \cdot dt}{t_s}}. \quad (294)$$

Еще раз следует указать, что если в это выражение вместо мощности на клеммах подставлять мощности на валу, то зависимость к. п. д. и $\cos \varphi$ от изменения мощности на валу учитываться не будет, и ошибка будет тем больше, чем большее место в данном режиме работы имеет недогрузка или холостой ход двигателя.

*) См. выше § 6, главы IV; также проф. Ринкевич, „Методы исследования электроприводов, „Вестник электропромышленности“, 1932, № 1 и 2.

Между тем практически наиболее часто метод применяют в таком упрощенном виде: $P_{m.g} = \sqrt{\frac{\sum P^2 \cdot t}{\sum t}}$, исходя именно из полезной мощности, т. е. мощности на валу. Пренебрежение ошибкой оправдывается, с одной стороны, приближительностью подсчетов полезной мощности, а с другой стороны, необходимостью считаться при выборе двигателя со шкалой стандартных мощностей. Это последнее „округление“ мощности *) очень часто делает бесполезным достигаемое с известными затруднениями уточнение при пользовании током или мощностью на клеммах.



Фиг. 317.

Итак для диаграммы вида фиг. 317 средняя квадратичная мощность выразится:

$$P_{m.g} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \frac{1}{3}(P_1^2 + P_2^2 + P_3^2)t_3 + P_4^2 t_4 + \frac{1}{3}(P_4^2 + P_5^2 + P_6^2)t_5 + P_6^2 t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}}, \quad (244)$$

т. е. вычисление должно быть распространено на один полный цикл t_a до начала его повторения.

Проф. Broughton (The Electrician, 1917) указывает на неясность в методе подсчета $P_{m.g}$ в случае трапециoidalной диаграммы.

На примере диаграммы, по виду напоминающей трапецию (период t_a , фиг. 317), где в начале рабочего периода $P = 20$ HP, а в конце $P = 10$ HP, он показывает результаты применения трех общепринятых формул для подсчета $P_{m.g}$:

$$1. P_{m.g} = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right)^2 \cdot t_a}{t_a + t_0}} = 10,6 \text{ HP};$$

$$2. P_{m.g} = \sqrt{\frac{\frac{P_1^2 + P_2^2}{2} \cdot t_a}{t_a + t_0}} = 11,18 \text{ HP};$$

$$3. P_{m.g} = \sqrt{\frac{\frac{P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2}{3} t_a}{t_a + t_0}} = 10,8 \text{ HP}.$$

Из этих формул он считает третью наиболее правильной.

*) Коэффициент возрастания мощности по германскому стандарту колеблется от 1,25 до 1,5, а по русскому — от 1,29 до 2,15.

В заключение можно указать на несколько поправок к этому методу:

1. Если двигатель в период холостой работы отключается от сети, останавливается и затем снова разгоняется, т. е. ослабляет самовентиляцию в наиболее тяжелые периоды усиленной нагрузки (см. диаграмму скорости n фиг. 318), то это ухудшение термических условий можно учесть, вводя в знаменатель выражения $P_{м.г}$, время t_s и t_0 замедленного вращения с коэффициентом 0,75, а время паузы с коэффициентом 0,5.

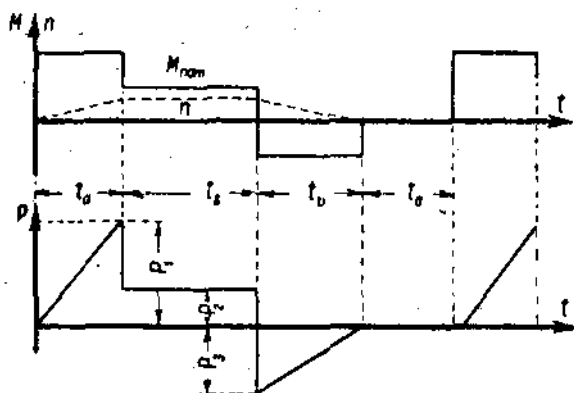
Существует другое предложение—учитывать коэффициентом 0,33 только время паузы t_0

$$P_{м.г} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_b + P_2^2 t_s + P_3^2 t_0}{0,75 t_b + t_s + 0,75 t_0 + 0,5 t_0}}$$

или

$$P_{м.г} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_b + P_2^2 t_s + P_3^2 t_0}{t_b + t_s + t_0 + 0,33 t_0}}$$

Мощность в период пуска и торможения принимается обычно постоянной и равной максимальной, так как ток постоянен.



Фиг. 318.

2. Второй неточностью является пренебрежение зависимостью нагревания двигателя от напряжения, колебания которого в заводских сетях бывают значительны. Подробнее об этом см. последнюю главу.

3. Наконец, кроме этих несущественных поправок, всегда следует иметь в виду одну, которая в известных случаях может быть

очень существенной, а именно поправку на температуру окружающей среды, если она значительно отличается от 35° С, принимаемой за нормальную при оценке мощности двигателей.

Так как превышение температуры двигателя над окружающей средой пропорционально потерям, то для нормальной температуры нормальное превышение в 50° С выразится:

$$85^\circ - 35^\circ = c \cdot \left(k + \frac{k}{\alpha} \right).$$

Тогда для случая какого-либо другого значения окружающей температуры t° при той же конечной температуре двигателя в 85° С

двигатель мог бы выдержать другую нагрузку, в x раз отличную от первой: *)

$$85 - \tau_1 = c \cdot \left(k + \frac{k}{\alpha} x^2 \right),$$

откуда

$$(85 - \tau_1) \cdot \left(k + \frac{k}{\alpha} \right) = \left(k + \frac{k}{\alpha} x^2 \right) (85 - 35)$$

или

$$x = \sqrt{1,7 + 0,7\alpha - 0,02\tau_1(\alpha + 1)}. \quad (295)$$

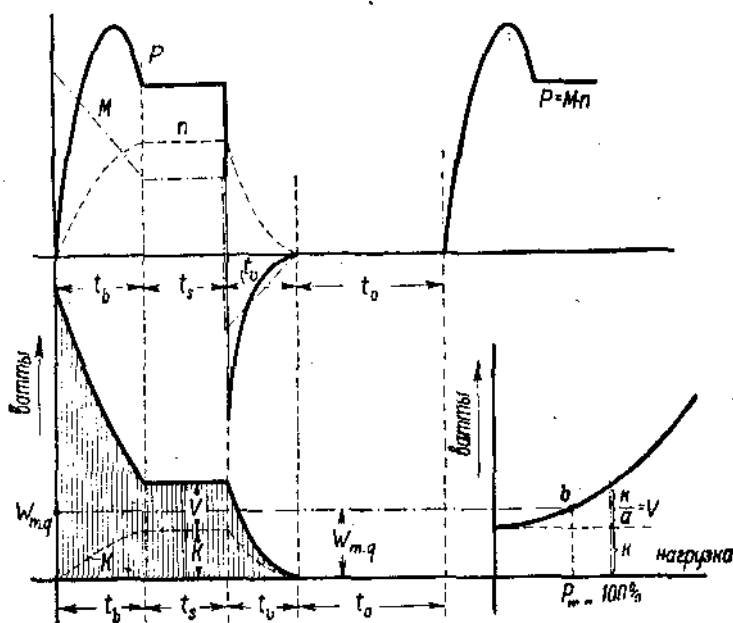
Например, если нормальный шунтовой двигатель, допустим, мощностью в 20 kW с коэффициентом потерь $\alpha = \frac{k}{v} = 1$, установлен в помещении с температурой 45° C, то его можно безопасно нагрузить гораздо меньшей нагрузкой, а именно:

$$x = \sqrt{1,7 + 0,7 - 0,02 \cdot 45 \cdot 2} = 0,775,$$

т. е. допустимая нагрузка:

$$P_1 = 0,775 \cdot 20 = 15,5 \text{ kW}.$$

Графический метод определения эквивалентной мощности. Инж. В. Леман („Die Elektrotechnik und die elektromoto-

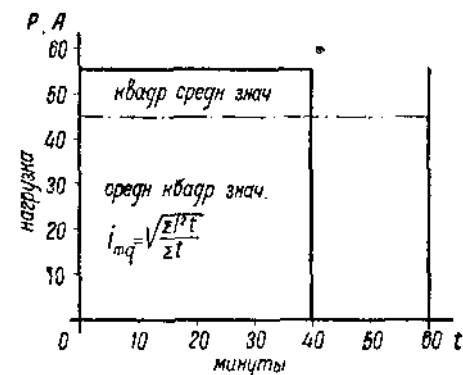
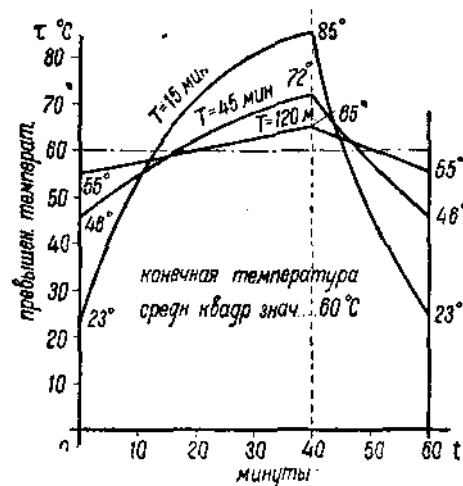


Фиг. 319.

*) Величина k принимается той же, считая, что x не очень сильно отличается от единицы, т. е. что двигатель будет незначительно изменен по мощности.

гических Анtriebe") указывает в самых общих чертах графический метод определения эквивалентной мощности, требующий знания характеристик двигателя.

В отличие от других методов, здесь, кроме диаграммы моментов (токов) и числа оборотов, строится (фиг. 319) диаграмма соответственных им переменных и постоянных потерь. Последние, как известно, можно считать пропорциональными числу оборотов. Планиметрируя сумму площадей работы потерь за один цикл и



Фиг. 320.

нагрузки остаются непригодными в расчет, между тем как они несомненно разрушающе действуют на изоляцию.

Проистекающая отсюда ошибка (опасность мгновенных перегревов) будет тем больше, чем меньше постоянная времени T двигателя.

На фиг. 320 представлены кривые нагрева двух различных типов двигателей одной и той же мощности и кривая нагрева кабеля, а пунктиром дана прямая нагрева, соответствующая средней эквивалентной постоянной нагрузке. Из сравнения их ясно, что применение метода эквивалентной мощности дает значительно меньшую

оценку потерь, чем метод, основанный на продолжительности цикла $t_s = t_b + t_s + t_v + t_0$, можно точно определить эквивалентные потери $W_{м.г}$. Проводя через точку $W_{м.г}$ горизонталь до пересечения с кривой потерь, построенной на фиг. 319 с правой стороны внизу для ориентировочно намеченного двигателя (в функции загрузки), можно определить, насколько удачно подобран двигатель: если точка пересечения b покажет, что получаемая мощность $P_{м.г}$ сильно отличается от предварительно взятой и принятой за 100%, то построение придется повторить.

Заканчивая на этом рассмотрение главных способов расчета мощности двигателя, умышленно подробное в виду капитального значения этого вопроса в технике электропривода, отметим в заключение еще раз недостаток, общий всем им, кроме единственно точного первого способа, а именно учет только среднего нагрева двигателя средним квадратичным током. При этом мгновенные колебания температуры от толчков (пик)

ошибку для закрытого двигателя, где $T = 120$ мин, чем для открытого хорошо вентилируемого, где $T = 45$ мин. и для кабеля ($T = 15$ мин.).

Надо заметить, что американскими нормами для тяговых двигателей предусматривается необходимость учета этого кратковременного перегрева на максимумах нагрузки („the peak load“) следующим приблизительным путем: берется диаграмма нагрузки на участке пути, соответствующем наибольшим пикам, и определяются потери по характеристике к. п. д. Разность максимальных потерь и средних, соответствующих эквивалентному току, поделенная на теплоемкость электродвигателя, даст мгновенное добавочное повышение температуры, которая не должна превысить нормированную. Теплоемкость двигателя при часовой мощности приблизительно принято измерять отношением электрических потерь в киловаттах (при работе в течение одного часа) к соответственному наибольшему наблюдаемому повышению температуры Δt (за тот же 1 час). Таким образом нормами не учитывается влияние теплоотдачи, очевидно в виду относительной кратковременности работы.

§ 9. Выбор двигателя по специальным каталогам „временных мощностей“.

Выше, при изложении методов расчета мощности, всюду подчеркивалась необходимость знания технических данных электродвигателей, т. е. постоянных T и T_0 , характеристик M/i или к. п. д. и мощности. По целому ряду причин заграничные электротехнические фирмы весьма неохотно идут навстречу потребителям их продукции именно в этом отношении, предлагая принять на себя и проектирование электропривода.

Правда, год от года под давлением потребителей, проектирующих организаций и новых требований Норм фирмы принуждены в своих каталогах давать все более подробные технические сведения (например прерывистую мощность); тем не менее эта уступка охотнее выражается в выработке своеобразных способов выбора мощности в определенных отраслях электрического привода (крановой и т. п.), чем в опубликовании нужных технических данных. И вполне естественно, что здесь нет уже общности, свойственной изложенным выше методам. Наоборот, область применения приводимых ниже „руководств по выбору“ ограничивается теми отраслями массового применения двигателей „прерывистого режима работы“, где опыт фирм мог накопиться до размеров, позволяющих установление „стандарта“.

В основу первого по времени руководства для выбора мощности крановых двигателей была положена так называемая „временная мощность“. Подбор мощности производится помощью таблиц и указаний в специальных каталогах, и, очевидно, от выбирающего двигатель требуется лишь знакомство с этими инструкциями и доверие к многолетнему опыту фирм; в каталогах против каждого типа электродвигателя дается целый ряд временных мощностей, которые он может выдержать строго определенное количество минут: 30, 45, 60 и 90 мин., а в пояснительной части можно прочесть совет, в каких областях электропривода можно применить ту или другую мощность.

Так, например, фирма Сименс-Шуккерт в своих известных крановых проспектах Preisliste 18—1913 дает таблицу, в которой:

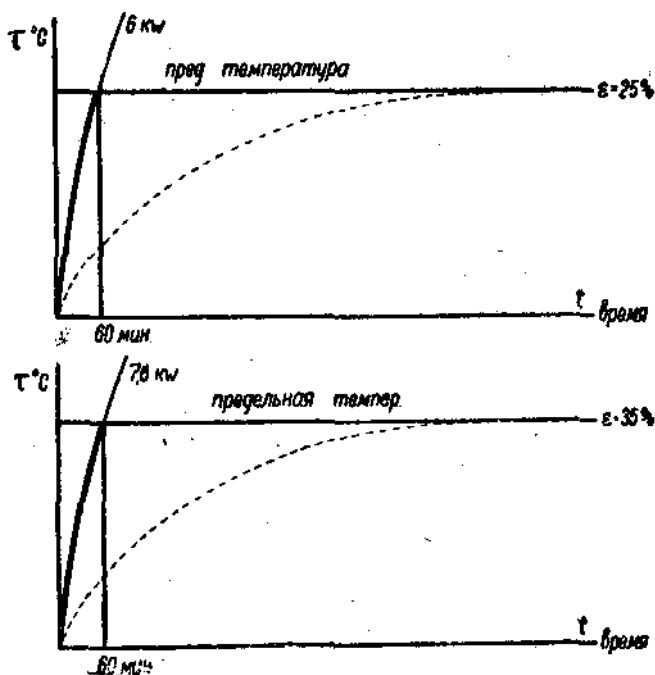
1) 30-минутная мощность рекомендуется для кранов электрических станций, поворотных кругов на железных дорогах, передвижных платформ, разводных мостов, шлюзов и плотин;

2) 45-минутная мощность — в портовых кранах для штучных товаров, в заводских кранах, в обыкновенных литейных кранах;

3) 60-минутная мощность — в портовых кранах для массовых грузов, в подъемниках с автоматическим грейфером, в нормальных рольгангах;

4) 90-минутная мощность — для специальных штриппер-кранов, специальных литейных кранов, вспомогательных орудий для прокатки, тяжелых рольгангов.

Нормы времени здесь несколько отличны от тех, которые фирма AEG еще в 1909 г. ввела в своих прейскурантах (30-, 40-, 60- и 80-ми-



Фиг. 321а.

нутная мощность) и более соответствуют последним каталогам за 1921 г.

Надо заметить, что и этот довольно грубый способ имеет некоторую историю своего развития: действительно, оценка по кратковременной работе может быть произведена по двум признакам, когда конечная температура двигателя достигается:

а) либо при данной продолжительности работы с искомой эквивалентной нагрузкой,

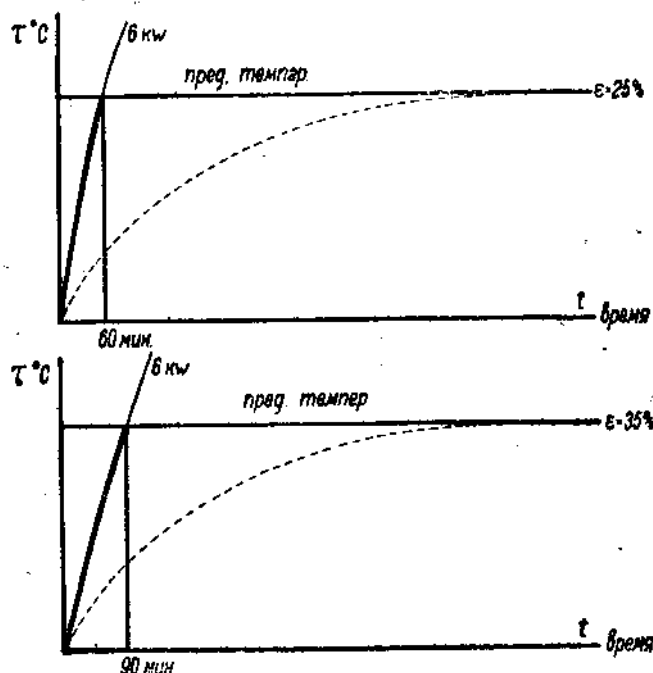
б) либо при данной нагрузке по истечении искомой продолжительности ее.

Первоначально за основание оценки был принят 1-й признак, и в Германии в 90-х годах за данную эквивалентную продолжительность взяли 1 час.

Пусть, например, имеется прерывистая работа с некоторой расчетной полной мощностью в 6 kW и продолжительностью включения $\epsilon = 25\%$. Это соответствует часовой непрерывной работе при 6 kW, как видно из верхней кривой фиг. 321 а. Тогда для какого-то другого режима, например $\epsilon = 35\%$, требуется, конечно, другой двигатель, который в течение того же одного часа выдерживает по опытному определению 7,5 kW (см. нижнюю кривую фиг. 321 а).

Однако такая оценка прерывистости работы оказалась недостаточно эластичной, т. е. чрезмерно щедрой в крановой прерывистой работе двигателей и недостаточной в работе рольгангов и т. п.

К оценке по второму признаку эквивалентной искомой продолжительности перешли в Германии около 1910 г



Фиг. 321б.

Возьмем тот же пример: если для прерывистой работы с нагрузкой в 6 kW при $\epsilon = 25\%$ подходит двигатель часовой мощности в 6 kW, то для другого режима $\epsilon = 35\%$ оказывается подходящим двигатель той же данной расчетной мощности, но не часовой, а 90-минутной (см. кривую фиг. 321 б).

В 1912 г. были введены в Нормы все мощности 10-, 40-, 60- и 80-минутные, а с 1 июля 1914 г.—10-, 30-, 45-, 60- и 90-минутные мощности.

Такой способ выбора мощности электродвигателя при прерывистой работе помощью эмпирической оценки последней некоторым эквивалентным номинальным временем непрерывной и постоянной

ной нагрузки (Dauernennlauf), по истечении которого двигатель нагреется до нормы, будучи достаточно точным в случае кратковременной работы, оказывается конечно весьма приближенным для случая прерывистой, в особенности „неравномерно-повторной“. Действительно, в последнем случае этой эмпирической произвольной оценкой *) ни в какой мере не учитывается ни влияние пауз, т. е. охлаждения двигателя, ни неравномерность нагрузки, которую, однако, повторные пуски делают гораздо более значительной, чем в первом случае.

Легко представить себе, к каким ошибкам приводил выбор некоторой кратковременной мощности в случае прерывистой работы.

Насколько кратковременная мощность должна быть точнее определена, так как она есть в сущности перегрузочная мощность, видно из обычной гарантии фирмы для допустимого времени определенной перегрузки (см. табл. 68, взятую из каталога фирмы Вестингауз, № 14/1):

ТАБЛИЦА 68.
Продолжительность перегрузки.

Допустимая перегрузка в % Мощность	25	50	100
1/3-часовая	6 мин.	3 мин.	мгновени.
1-часовая	15 „	5 „	„
2-часовая	30 „	10 „	„

Таким образом, работа проектирующего сводится лишь к вычислению поправки на неравномерность нагрузки в течение периода работы, так как кратковременные мощности даются в предположении ровной нагрузки. Поправка эта вычисляется методом эквивалентной мощности, применяемым, конечно, только к периоду работы t_a , а не паузы, или берется прямо из таблиц и кривых, указываемых ниже при изложении следующего способа.

§ 10. Выбор двигателя по специальным каталогам „прерывистых мощностей“.

В виду явной неприменимости временных мощностей для выбора двигателя с прерывистым режимом работы, в Нормы введено понятие о прерывистой мощности, т. е. мощности, которую фирма должна гарантировать для данного режима работы $= \frac{t_a}{t_a + t_0}$, стандартизируемого для кранов в трех величинах $= 0,15, 0,25$ и $0,40$.

*) Лишь за последние годы разработаны некоторые теоретические обоснования для оценки прерывистой работы некоторым эквивалентом времени непрерывной работы (см. выше „Bewertungszeit H.“).

Соответственно требованиям Норм фирмы видоизменили и свои руководства по выбору двигателя, приспособив их для прерывистой работы в виде специальных каталогов, причем место временных мощностей заняли ряды (ряды нагрузки — Belastungsreihen). Авторы этих рядов, инж. Адлер и Шибелер, приводят следующие факторы, обуславливающие развитие и распределение тепла в двигателях при прерывистой работе, которые положены в основу составления рядов, индивидуальных для каждого рода и типа двигателей:

- 1) частота включений h , т. е. число рабочих циклов в 1 час;
- 2) время включения t_a , т. е. продолжительность его в течение определенного цикла работы, чаще всего выражаемая коэффициентом ε ;
- 3) „острота“ (Schärfe) или неравномерность нагрузки S (отношение средней нагрузки к полной), учитывающая „переменность“ нагрузки в различные циклы, например подъема и спуска;
- 4) тепло ускорения, которое создается излишком тока, соответственно избыточному моменту, идущему на ускорение масс;
- 5) тепло замедления, которое порождается электрическим торможением при движении по инерции (Nachlaufbremsung);
- 6) тепло, развиваемое при электрическом торможении спуска (Senkbremsung).

Остановимся несколько подробнее на рассмотрении вышеперечисленных пунктов.

Частота включения имеет значение для аппаратов управления и является основой для их выбора (см. Правила VDE для выбора и испытания аппаратов управления).

Под частотой включения понимается число включений аппаратов управления за 1 час при интенсивной работе.

Она характеризует род работы. При легкой работе (монтажный кран на электрической станции) величина h крайне невелика; при интенсивной работе крана в мастерской она находится в пределах 100—120, при литейных кранах — 150—200, при кранах горнозаводских (при значительной работе ускорения) она достигает 300—400 в 1 час; при вспомогательных устройствах прокатных станков (рольганги, подъемные столы) доходит до 1000 и выше.

Чем больше частота h , тем с большим запасом надо брать аппаратуру управления.

Для выбора двигателя интересно знать ту часть h_b , при которой достигается полная установившаяся скорость, т. е. контроллер выводится до последнего контакта, так как крановщики часто вводят и выводят первую ступень реостата для достижения передвижения на незначительном расстоянии, но сила тока при этом не достигает двойной, и никакой почти работы ускорения не производится.

Даже при горнозаводских кранах (где определенная работа ускорения существует) все же величина h_b часто составляет едва $\frac{1}{4} h$, что надо помнить во избежание чрезмерного увеличения выбираемой мощности двигателя.

Однако влияние h на величину прерывистой мощности P_p меньше, чем влияние ε , как видно из сравнения фиг. 322 и фиг. 323, состав-

явленных для 8 различных двигателей, данные о которых указаны в виде синхронной скорости n_0 и опрокидывающего момента M_k : на фиг. 323 кривая 1 относится к двигателю, имеющему синхронную скорость $n_0 = 600$ об/мин и опрокидывающий момент

$$M_k = 460 \text{ kgm.}$$

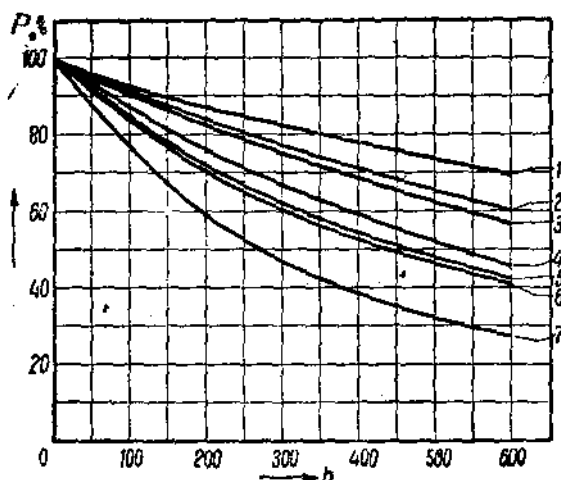
Кривая 2	соответствует	$n_0 = 750$ об/мин	$M_k = 420$ kgm
" 3	"	$n_0 = 600$	" $M_k = 205$ "
" 4	"	$n_0 = 600$	" $M_k = 50$ "
" 5	"	$n_0 = 1000$	" $M_k = 155$ "
" 6	"	$n_0 = 750$	" $M_k = 180$ "
" 7	"	$n_0 = 750$	" $M_k = 55$ "
" 8	"	$n_0 = 1000$	" $M_k = 50$ "

На фиг. 322 кривая 1 относится к двигателю, имеющему

$$n_0 = 600 \text{ об/мин, } M_k = 50 \text{ kgm.}$$

Кривая 2	соответствует	$n_0 = 750$ об/мин	$M_k = 55$ kgm
" 3	"	$n_0 = 1000$	" $M_k = 50$ "
" 4	"	$n_0 = 600$	" $M_k = 205$ "
" 5	"	$n_0 = 750$	" $M_k = 180$ "
" 6	"	$n_0 = 1000$	" $M_k = 155$ "
" 7	"	$n_0 = 600$	" $M_k = 460$ "

Во всяком случае указанное влияние различно для различных величин и типов двигателей: чем больше двигатель, тем оно сильнее, т. е. тем сильнее падает прерывистая мощность P_p с уве-



Фиг. 322.

личением h , так как массы и пусковой ток больше, а поверхность, т. е. отдача тепла относительно (на единицу мощности) меньше; при одинаковой же величине влияние h тем больше, чем быстреходней двигатель, так как тем больше продолжительность пуска t_p .

Факторы, указанные в поз. 1 и 2, стр. 129, характеризуются совокупно коэффициентом

$$\text{включения } \epsilon = \frac{t_a}{t_a + t_0}, \text{ т. е.}$$

ϵ — сумма продолжительности всех включений в мин. за один час.

Испытаниями, произведенными с помощью особого счетчика циклов (der Spielzähler), величина ϵ установлена для кранов в пределах от 0,15 до 0,40:

- 0,15 — для слабой нагрузки
- 0,25 — „ нормальной нагрузки
- 0,35 — „ усиленной „
- 0,40 — „ напряженной „ (литейные краны)

Относительно остроты S (die Schärfe) различаются:

а) работа с переменной нагрузкой, например работа двигателя на лебедках от холостой до подъема наибольшего груза, также отчасти работа передвижения тележки с разным весом грузов, подвешенных на лебедке тележки;

в) работа с полной нагрузкой, например двигателей, обслуживающих передвижение кранового моста, вращение крана и т. п., когда передвигаемые массы настолько велики, что изменение полезного груза почти не отражается на нагрузке.

При составлении рядов в целях известного запаса прочности работу с переменной нагрузкой считают, если острота $S < 0,6$, а работу с полной нагрузкой, если $S > 0,6$.

Всего предложено 4 нагрузочных ряда, обозначаемых в каталогах римскими цифрами (см. табл. 69); при выборе двигателя необходимо отыскать в каталоге нужную мощность и выбрать ряд, соответствующий режиму.

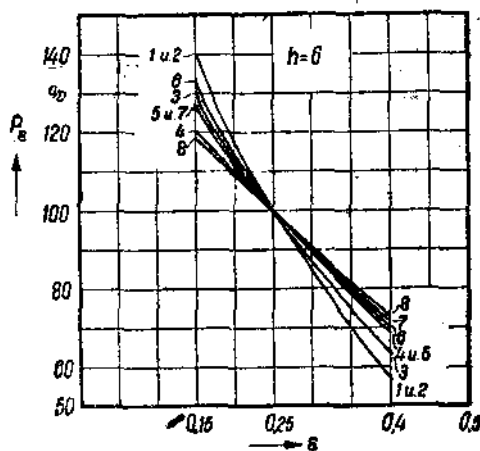
Таким образом этот способ учитывает, кроме периодов работы и пауз, также и характер самой работы.

Однако следует все же заметить, что условия нагревания учитываются весьма приблизительно.

Авторы оговариваются, что составленная ими таблица не предусматривает различия в обмотках для разных рядов закрытых (капселированных) серийно-двигателей постоянного тока. Однако это было бы не совсем правильно для шунтовых электродвигателей, а в особенности для трехфазных асинхронных закрытых двигателей, ибо для рядов I и II (легкой работы) магнитная плотность допускается большая, чтобы повысить перегрузочную способность

$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$$

Обычно в последних каталогах приводятся как временные мощности, так и ряды прерывистых мощностей.



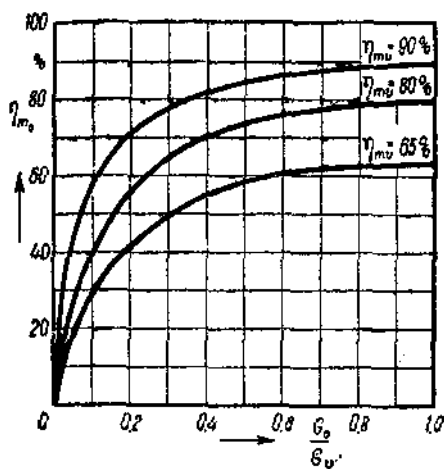
Фиг. 323.

Вели-	Тип

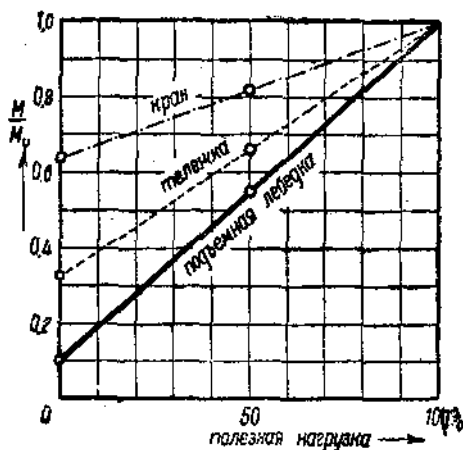
Величина	Тип	Кратковременная мощность										Прерывистая мощность										Допустимая минимальная нагрузка									
												I ряд		II ряд		III ряд		IV ряд													
												Переменная нагрузка																			
												Легкая раб. $\epsilon = 0,15$		Норм. раб. $\epsilon = 0,25$		Тяжелая раб. $\epsilon = 0,35$															
																Легкая раб. $\epsilon = 0,15$		Норм. раб. $\epsilon = 0,25$		Тяжелая раб. $\epsilon = 0,35$											
30-минутная		45-минутная		60-минутная		90-минутная																									
P kW	n об/м ³	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м	P kW	n об/м		
HNK = 102	0,4	980	0,38	1 050	0,36	1 100	0,34	1 150	0,4	980	0,4	980	0,4	980	0,4	980	0,4	980	0,4	980	0,4	980	0,4	980	0,4	980	0,4	980	0,4		
HNK = 204	1,1	1 300	0,96	1 360	0,92	1 420	0,86	1 540	1,1	1 300	1,1	1 300	1,1	1 300	1,1	1 300	1,1	1 300	1,1	1 300	1,1	1 300	1,1	1 300	1,1	1 300	1,1	1 300	1,1		
KR = 2,3	2,4	1 240	2,1	1 320	1,9	1 400	1,5	1 580	2,4	1 240	2,4	1 240	2,4	1 240	2,4	1 240	2,4	1 240	2,4	1 240	2,4	1 240	2,4	1 240	2,4	1 240	2,4	1 240	2,4		
KR = 3,3	3,6	1 230	3,2	1 320	2,8	1 410	2,5	1 520	3,6	1 230	3,6	1 230	3,6	1 230	3,6	1 230	3,6	1 230	3,6	1 230	3,6	1 230	3,6	1 230	3,6	1 230	3,6	1 230	3,6		
KR = 5,8	6,2	1 070	5,4	1 140	4,8	1 230	3,3	1 420	6,2	1 070	6,2	1 070	6,2	1 070	6,2	1 070	6,2	1 070	6,2	1 070	6,2	1 070	6,2	1 070	6,2	1 070	6,2	1 070	6,2		
WD = 8	7,6	875	6,6	935	5,8	990	4,6	1 090	7,6	875	7,6	875	7,6	875	7,6	875	7,6	875	7,6	875	7,6	875	7,6	875	7,6	875	7,6	875	7,6		
WD = 12,5	13,5	690	11,0	750	9,8	800	8,2	875	13,5	690	13,5	690	13,0	700	10,0	750	8,0	890	2,6	1 500	2,6	1 500	2,6	1 500	2,6	1 500	2,6	1 500	2,6		
WD = 17,5	18,5	655	15,8	700	14,0	750	11,5	850	18,5	655	18,5	655	18,0	660	13,7	760	10,9	875	3,9	1 400	3,9	1 400	3,9	1 400	3,9	1 400	3,9	1 400	3,9		
WD = 25	27,0	640	22,5	680	20,0	715	16,5	770	27,0	640	24,4	660	18,8	740	15,0	800	5,0	1 400	5,0	1 400	5,0	1 400	5,0	1 400	5,0	1 400	5,0	1 400	5,0		
WD = 36	37,0	560	31,3	595	27,5	630	21,5	700	37,0	560	31,0	660	24,0	670	19,2	730	7,4	1 250	7,4	1 250	7,4	1 250	7,4	1 250	7,4	1 250	7,4	1 250	7,4		
WD = 55	54,0	510	45,5	540	40,0	575	32,0	635	53,5	515	43,0	550	32,8	625	26,4	675	10,4	1 100	10,4	1 100	10,4	1 100	10,4	1 100	10,4	1 100	10,4	1 100	10,4		
WD = 75	75,0	485	63,0	510	57,0	540	46,0	590	74,5	490	60,5	530	44,5	595	36,2	640	14,3	1 000	14,3	1 000	14,3	1 000	14,3	1 000	14,3	1 000	14,3	1 000	14,3		

Неравномерность нагрузки S в приводе кранов принято еще выражать относительным моментом M_r :

$$S = M_r = \frac{M_s + M_0}{2} : M_s = \frac{1 + \frac{M_0}{M_s}}{2}, \quad (296)$$



Фиг. 324.



Фиг. 325.

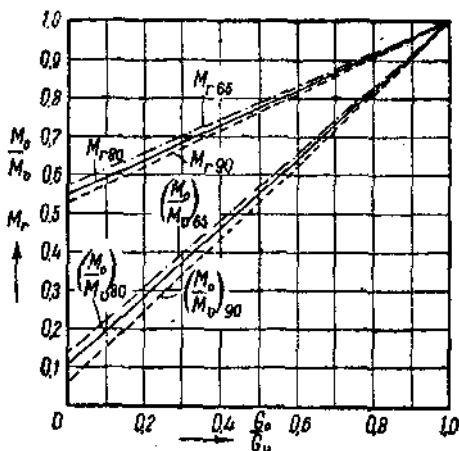
где M_0 — момент при холостом ходе, M_s — момент при полной нагрузке.

Отношение же $\frac{M_0}{M_s}$ определяется из отношения $\frac{G_0}{G_s}$ мертвого груза к полному, с учетом к. п. д. кранового механизма, меняющегося при различных нагрузках (фиг. 324)

$$\frac{M_0}{M_s} = \frac{G_0}{\eta_0} : \frac{G_s}{\eta_s}.$$

Значения $\frac{M_0}{M_s}$ и M_r в функции $\frac{G_0}{G_s}$ и $(G_s - G_0)$ представлены на фиг. 325 и 326, причем в последней прямые с цифрами 65, 80 и 90 относятся к значениям к. п. д. кранового механизма 65, 80 и 90%.

Несомненно, что при малых значениях S или M_r прерывистую мощность двигателя можно выбрать не по полной нагрузке P_s , а по некоторой меньшей — „равной“ нагрузке P_r , как это видно из фиг. 327.



Фиг. 326.

Так как прерывистая мощность (как и длительная) есть мощность, которую двигатель должен развивать неограниченно долгое время, то все тепло, развиваемое в нем, должно отдаваться наружу, независимо от того, будет ли оно происходить от действия постоянно протекающего тока (при длительной нагрузке) или от тока прерывистой работы, соответственно большего по силе, но действующего периодически. Таким образом, например при режиме $\varepsilon = 0,25$, количество тепла теоретически может быть в 4 раза $\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)$ более. Предполагая потери пропорциональными P и $P = i$, выводим формулу средней квадратичной мощности

$$P_{m.q} = P_s \cdot \sqrt{\varepsilon}.$$

Считая $P_{m.q} = \text{const}$, имеем:

$$P_{s,\varepsilon_1} = P_s \sqrt{\varepsilon_2}$$

или

$$\frac{P_{s,\varepsilon_1}}{P_s} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}};$$

отсюда отношение:

$$\frac{P_{s=0,15}}{P_{s=0,25}} = \sqrt{\frac{0,25}{0,15}} = 1,29$$

и

$$\frac{P_{s=0,40}}{P_{s=0,25}} = \sqrt{\frac{0,25}{0,40}} = 0,79.$$

На этом основании в табл. 70 представлено теоретическое отношение полной мощности P_s к средней квадратичной $P_{m.q}$ для различных значений M_r и различных ε .

Применяя уравнение средней квадратичной мощности к фиг. 327 и считая для двигателей с жесткой характеристикой $t_{a1} = t_{a2}$, имеем:

ТАБЛИЦА 70.

Теоретические значения $P_s : P_{m.q}$.

$\varepsilon \backslash M_r$	0,55	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
0,15	3,64	3,57	3,42	3,14	2,86	2,58
0,20	3,14	3,10	2,93	2,71	2,47	2,23
0,25	2,82	2,78	2,62	2,43	2,21	2,00
0,30	2,56	2,53	2,40	2,21	2,01	1,82
0,35	2,38	2,35	2,22	2,04	1,87	1,69
0,40	2,22	2,18	2,08	1,92	1,75	1,58

$$P_{m.q} = \sqrt{\frac{P_v^2 t_a + P_0^2 t_a}{t_s}} = \sqrt{\frac{P_s^2 \cdot 2 t_a}{t_s}}$$

или

$$P_s \cdot \sqrt{\left[1 + \left(\frac{P_0}{P_s}\right)^2\right] \frac{t_a}{t_s}} = P_s \cdot \sqrt{2 \frac{t_a}{t_s}}$$

откуда

$$p_{m_0} = \frac{P_0}{P_s} = \sqrt{\frac{2}{1 + \left(\frac{P_0}{P_s}\right)^2}}$$

Это значение теоретического коэффициента перегрузки в функции M_r представлено на фиг. 328.

Для двигателей с мягкой характеристикой время работы крана с холостым крюком t_{a_1} будет несколько меньше t_{a_1} , и предыдущая формула примет вид

$$p_{m_0} = \frac{P_0}{P_s} = \sqrt{\frac{2}{1 + \left(\frac{P_0}{P_s}\right)^2 \frac{t_{a_1}}{t_{a_2}}}}$$

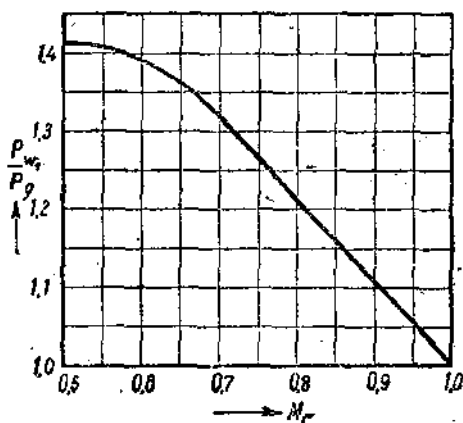
(для гомогенного двигателя).

С другой стороны, можно неравномерность нагрузки учитывать не мощностью, а увеличением продолжительности включения: каждому значению равной прерывистой нагрузки P_g соответствует одна и та же P_0 при продолжительности включения ϵ , тем большей, чем меньше M_r . Обозначая коэффициент включения при равной нагрузке через ϵ_g и через ϵ_0 — при неровной, имеем

$$\frac{\epsilon_0}{\epsilon_g} = \frac{P_g^2}{P_0^2} = \frac{2}{1 + \left(\frac{P_0}{P_s}\right)^2}$$

для трехфазного тока и

$$\frac{\epsilon_0}{\epsilon_g} = \frac{P_g^2}{P_0^2} = \frac{2}{1 + \left(\frac{P_0}{P_s}\right)^2 \frac{t_{a_1}}{t_{a_2}}}$$



Фиг. 328.

ТАБЛИЦА 71.

M_r	$\frac{\epsilon_0}{\epsilon_g}$ (теоретич.)
0,50	1,98
0,60	1,91
0,70	1,73
0,80	1,48
0,90	1,22
1,00	1,00

для серийс-двигателя постоянного тока.

Разница между обеими формулами невелика, и табл. 71 относится к обеим.

Итак, неравномерность прерывистой нагрузки может учитываться: а) или некоторым коэффициентом $p_{m_0} = \frac{P_0}{P_s}$ (по фиг. 328), причем при выборе по каталогу принимается некоторая равная нагрузка P_g , б) или некоторым удлинением (укорочением) времени работы t_{a_1} , т. е. величины ϵ (см. табл. 72 и получающую из нее табл. 75).

ТАБЛИЦА 72.

 $\epsilon_{\text{в}}$ при неравномерной нагрузке M_r

$\epsilon_{\text{в}}$ при равной на- грузке P_g	M_r	0,55	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
0,15		0,296	0,285	0,260	0,22	0,18	0,15
0,20		0,896	0,386	0,346	0,296	0,244	0,20
0,25		0,495	0,48	0,43	0,37	0,305	0,25
0,30		0,594	0,573	0,52	0,44	0,365	0,30
0,35		0,694	0,67	0,605	0,52	0,425	0,35
0,40		0,792	0,76	0,69	0,59	0,49	0,40

Все эти коэффициенты для пересчетов мы называли теоретическими, так как распределение потерь в двигателях и их относительное значение меняются при изменении нагрузки, меняется к. п. д., меняется отношение $\frac{P}{I}$, и, следовательно, постоянство $P_{m.g}$ не будет иметь места.

Действительно, средняя квадратичная мощность $P_{m.g}$, рассчитанная из опытных данных выдерживаемой двигателем прерывистой мощности (см. далее фиг. 331), оказывается непостоянной. Например, для закрытого асинхронного двигателя:

$$P_{m.g} = P_{* = 0,15} \sqrt{0,15} = 27 \cdot 0,388 = 10,5 \text{ kW},$$

$$P_{m.g} = P_{* = 0,25} \sqrt{0,25} = 20,2 \cdot 0,5 = 10,1 \text{ kW},$$

$$P_{m.g} = P_{* = 0,40} \sqrt{0,40} = 14,8 \cdot 0,633 = 9,4 \text{ kW},$$

т. е., приняв $P_{m.g}$ для режима $\epsilon = 0,25$ за единицу, имеем поправки:

$$\frac{P_{m.g(0,15)}}{P_{m.g(0,25)}} = \frac{10,5}{10,1} = 1,04 \quad \text{и} \quad \frac{P_{* = 0,15}}{P_{* = 0,25}} = 1,33 = 1,29 \cdot 1,04,$$

$$\frac{P_{m.g(0,40)}}{P_{m.g(0,25)}} = \frac{9,4}{10,1} = 0,93 \quad \frac{P_{* = 0,40}}{P_{* = 0,25}} = 0,73 = 0,79 \cdot 0,93,$$

Высчитанные аналогичным образом поправки приведены в табл. 73 для указанного асинхронного двигателя (закрытого 380 V, закрытого 310 V и открытого 410 V) и в табл. 74 для серийного двигателя закрытого и открытого с вентилятором. Табл. 75 представляет значения табл. 72 с вышеуказанными поправками.

ТАБЛИЦА 73.

ε	$V \sqrt{\frac{z}{0,25}}$ при $P_{m,q} = \text{const}$	Закрытый 380 В		Закрытый 310 В		Открытый 410 В	
		$P_{m,q}$	$P_{g(\epsilon)}$	$P_{m,q}(\epsilon)$	$P_{g(\epsilon)}$	$P_{m,q}$	$P_{g(\epsilon)}$
		$P_{m,q} (0,25)$	$P_{g(0,25)}$	$P_{m,q} (0,25)$	$P_{g(0,25)}$	$P_{m,q} (0,25)$	$P_{g(0,25)}$
0,15	1,29	1,34	1,04	1,27	0,99	1,30	1,01
0,20	1,12	1,14	1,03	1,14	0,99	1,13	1,01
0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,30	0,91	0,91	0,99	0,91	0,99	0,90	0,98
0,35	0,84	0,82	0,95	0,83	0,98	0,82	0,96
0,40	0,79	0,73	0,93	0,76	0,97	0,74	0,94

ТАБЛИЦА 74.

ε	$V \sqrt{\frac{z}{0,25}}$ при $P_{m,q} = \text{const}$ (теоретич.)	Закрытый серийс-двигатель		Открытый серийс-двигатель с вентилятором	
		$P_{g(\epsilon)}$	$P_{m,q}$	$P_{g(\epsilon)}$	$P_{m,q}$
		$P_{g(0,25)}$ (действ.)	$P_{m,q} (0,25)$	$P_{g(0,25)}$ (действ.)	$P_{m,q} \epsilon = 0,25$
0,15	1,29	1,30	1,01	1,09	0,85
0,20	1,12	1,12	1,05	1,04	0,93
0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,30	0,91	0,90	0,99	0,96	1,05
0,35	0,84	0,81	0,96	0,93	1,11
0,40	0,79	0,73	0,94	0,91	1,15

ТАБЛИЦА 75.

Значения $\epsilon_w, \epsilon_{w_0}$ в процентах и $\frac{\epsilon_w}{\epsilon_{w_0}}$ для различных ϵ_g при различных M_r

Значения ϵ_g в процентах		$M_r = 0,55$	$M_r = 0,6$	$M_r = 0,7$	$M_r = 0,8$	$M_r = 0,9$	$M_r = 1$
15	$\epsilon_w =$	25	25	24	21	18	15
	$\epsilon_{w_0} =$	29,6	28,5	26	22	18	15
	$\frac{\epsilon_w}{\epsilon_{w_0}} =$	0,844	0,878	0,924	0,964	1,0	1,0
	$\frac{\epsilon_w}{\epsilon_{w_0}}$						
20	$\epsilon_w =$	32,5	32,5	31	27,5	23,5	20
	$\epsilon_{w_0} =$	39,6	38,2	34,6	29,6	24,4	20
	$\frac{\epsilon_w}{\epsilon_{w_0}} =$	0,82	0,852	0,896	0,93	0,964	1,0
	$\frac{\epsilon_w}{\epsilon_{w_0}}$						
25	$\epsilon_w =$	40	40	37,5	34	29	25
	$\epsilon_{w_0} =$	49,5	48	43	37	30,5	25
	$\frac{\epsilon_w}{\epsilon_{w_0}} =$	0,808	0,834	0,872	0,92	0,95	1,0
	$\frac{\epsilon_w}{\epsilon_{w_0}}$						

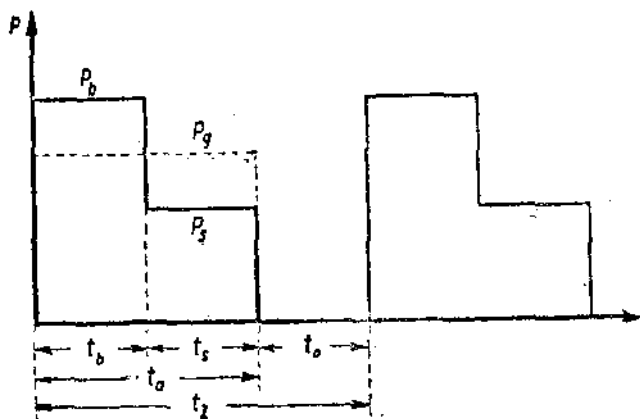
В табл. 75 приведено увеличение ϵ для трех значений ϵ_g : 0,15, 0,20 и 0,25 (или в процентах — 15, 20 и 25) при различных значениях M_r от 0,55 до 1,0, как вычисленные теоретически $\epsilon_{\text{теор}}$, так и с поправками на относительное увеличение потерь (ϵ_w).

Отсюда видно, что величина поправки увеличивается по мере уменьшения M_r и увеличения ϵ , но не выходит из пределов 20% (0,808) от теоретической величины $\epsilon_{\text{теор}}$.

Для серийно-двигателей постоянного тока в табл. 76 даны соответствующие удлинения ϵ против ϵ_g при различных значениях M_r .

ТАБЛИЦА 76.

M_r	Удлинение ϵ при переменной нагрузке $\frac{\epsilon_w}{\epsilon_g}$ для		
	$\epsilon_g = 0,15$	$\epsilon_g = 0,20$	$\epsilon_g = 0,25$
0,55	$\frac{25}{15} = 1,66$	$\frac{32,5}{20} = 1,63$	$\frac{40}{25} = 1,60$
0,60	$\frac{25}{15} = 1,66$	$\frac{32,5}{20} = 1,63$	$\frac{40}{25} = 1,60$
0,70	$\frac{24}{15} = 1,60$	$\frac{31}{20} = 1,55$	$\frac{37,5}{25} = 1,50$
0,80	$\frac{20}{15} = 1,40$	$\frac{27,5}{20} = 1,37$	$\frac{34}{25} = 1,35$
0,90	$\frac{18}{12} = 1,20$	$\frac{23,5}{20} = 1,18$	$\frac{29}{25} = 1,17$
1,0	1,0	1,0	1,0



Фиг. 329.

Учет тепла ускорения сводится также к учету неравномерности нагрузки, но не той неравномерности в различные периоды работы двигателя (например подъем, спуск), о которой выше говорилось, а неравномерности в течение одного и того же периода (т. е. к учету влияния пусковых условий). Согласно фиг. 329:

$$P_{\text{м.к}} = \sqrt{\frac{P_b^2 t_b + P_s^2 t_s}{t_a}} = \sqrt{\frac{P_g^2 (t_b + t_s)}{t_a}} = P_g \sqrt{\frac{t_a}{t_s}} = P_g \sqrt{\epsilon}.$$

Вводя $x = \frac{P_b}{P_s}$, имеем:

$$P_{\text{м.к}} = P_s \sqrt{\frac{x^2 t_b + t_s}{t_a}}.$$

Пренебрегая же увеличением мощности при пуске ($P_s - P$):

$$P'_{m.q} = P_s \sqrt{\frac{t_b + t_s}{t_s}} = P_s \sqrt{\varepsilon}.$$

Итак

$$\frac{P_{m.q}}{P'_{m.q}} = \frac{P_g \sqrt{\varepsilon}}{P_s \sqrt{\varepsilon}} = \frac{P_g}{P_s} = \frac{P_s \sqrt{\frac{x^2 t_b + t_s}{t_s}}}{P_s \cdot \sqrt{\frac{t_b + t_s}{t_s}}} = \sqrt{\frac{x^2 t_b + t_s}{t_b + t_s}}.$$

С другой стороны:

$$\begin{aligned} \frac{P_g}{P_s} &= \sqrt{\frac{x^2 t_b + (t_s - t_b)}{t_b + t_s}} = \sqrt{\frac{t_b (x^2 - 1)}{t_b + t_s} + 1} = \\ &= \sqrt{\frac{t_b (x^2 - 1)}{t_s \cdot \varepsilon} + 1}. \end{aligned} \quad (297)$$

Учитывая однако, что не всякое включение (особенно в крановой работе) длительно, следует ввести еще термин h_b — число включений в 1 час, при которых достигается полная скорость; тогда

$$\frac{t_b}{t_s} = \frac{t_b h_b}{3600}$$

и

$$\frac{P_g}{P_s} = \sqrt{\frac{t_b h_b (x^2 - 1)}{3600 \cdot \varepsilon} + 1},$$

или для $x=2$

$$\frac{P_g}{P_s} = \sqrt{\frac{t_b h_b}{1200 \cdot \varepsilon} + 1}.$$

На фиг. 330 даны поправки $\frac{P_g}{P_s}$ для трех значений ε в зависимости от $t_b h_b$.

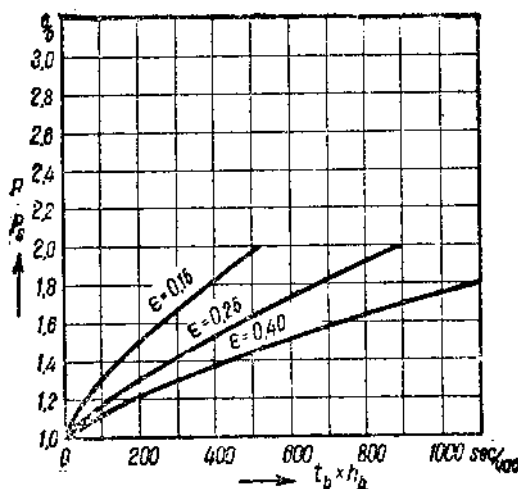
Естественно, что они тем больше при одинаковом значении $t_b h_b$, чем меньше ε .

Например, для механизма передвижения крана, допуская $x=2$ и $t_b=6$ сек., $h_b=60$ включений в 1 час, имеем при $\varepsilon=0,4$:

$$\frac{P_g}{P_s} = \sqrt{\frac{6 \cdot 60}{12 \cdot 40} + 1} = 1,32,$$

что явствует и из чертежа.

Итак, для определения добавки мощности в учет тепла ускорения



Фиг. 330.

необходимо знать лишь отношение

$$\frac{t_b}{t_b + t_a} = \frac{t_b}{t_{2a}}$$

которое можно считать как отношение продолжительности периодов „ускорения“ пуска

$$\beta = \frac{h t_b}{3600}$$

к продолжительности периодов включения двигателя

$$\varepsilon = \frac{h \cdot t_a}{3600}.$$

Так, например, если число включений двигателя в один час известно и равно h , то:

$$\frac{\beta}{\varepsilon} = \frac{t_b}{t_b + t_a} = \frac{t_b}{t_a} = \frac{t_b}{t_{2a}}.$$

Зависимость между отношением $\frac{\beta}{\varepsilon}$ и отношением $\frac{P_g}{P_s}$ может быть представлена в следующем виде (табл. 77):

ТАБЛИЦА 77.

$\frac{\beta}{\varepsilon}$	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50
$\frac{P_g}{P_s}$	1,14	1,20	1,27	1,38	1,50	1,60

При пользовании „рядами“ условия работы учитываются несколько шире, и проектирующему предоставляется несколько большая инициатива. Так, хотя весьма существенный фактор при выборе электродвигателя—число включений в единицу времени h —и дается в таблице (см. приложенный в конце книги образец таких таблиц), однако значения h , β и ε могут быть взяты и по личному усмотрению, предположительно или из личных наблюдений за аналогичными установками. Чтобы облегчить производство и накопление таких наблюдений, предложен особый автоматический регистратор, так называемый счетчик периодов работы (Spielzähler). *) Чем больше h , тем большее относительное влияние получает поправка $\frac{P}{P_0}$ на дополнительный нагрев. Наконец, при достаточно большом h и, главное, больших массах, может случиться, как это было уже

*) Подробное описание см. AEG-Mitteilungen, Juni 1920.

Регистрационные приборы конструируются для одно-, двух-, трех- и четырех-моторного привода и дают диаграмму в функции времени.

Последние приборы SSW имеют 12 перьев и могут регистрировать работу 12 двигателей.

отмечено в главе I на примере расчета времени разгона крана, что двигатель вообще не будет достигать в своей работе установившегося хода и все время будет работать на пусковом периоде, т. е. усиленном токе. Согласно указанным выше пояснениям „Erläuterungen der Belastungsreihen“, если h больше 50 (в час), то к мощностям, даваемым рядами, требуется добавление, высчитанное по формуле (297); в формулу эту входит время разгона t_s , которое в свою очередь подсчитывается по ур-нию (12).

Из самого факта необходимости пользования специальными каталогами видно, что оба изложенных способа применимы в ограниченных областях прерывистой работы подъемных механизмов или аналогичных по хорошо изученному режиму.

Характерными особенностями такой работы являются:

- 1) правильное чередование рабочих циклов по времени;
- 2) небольшая продолжительность цикла t_s , ограничиваемая в Норм-мах 10 мин., свыше которых работа считается уже продолжительной, а не прерывистой, и мощность в таких случаях подсчитывается как эквивалентная продолжительная;
- 3) наибольшая продолжительность рабочего периода t_a , не свыше, следовательно, 4 мин. ($\varepsilon_{\max} = 0,40$); однако и минимум ограничивается величиной $\varepsilon = 0,15$, ниже которой работа считается кратковременной.

К такой категории работ, кроме многочисленных разновидностей подъемных механизмов (кранов, лифтов и т. п.), можно отнести работу различных вспомогательных механизмов прокатных станов (рольгангов, нажимных винтов, опрокидывателей), вагонеток подвесных дорог, баггеров, работу по тартанию нефти. Если учесть мощность холостого хода P_0 , то сюда же можно отнести работу молотов, ножниц, пил и т. п.

Так как режим прерывистой работы стандартизирован лишь в трех разновидностях, а практически надо ожидать бесконечного его разнообразия в пределах 0,15—0,40, то естественным заключением изложения методов выбора прерывистой мощности является указание способа пересчета прерывистой мощности при фактическом, не стандартном режиме на некоторое новое значение ее при ближайшем стандартном значении. Пересчет этот необходимо делать с учетом особенностей данного рода или типа двигателя, сильно влияющих на отношение прерывистых мощностей, как далее будет показано.

Выше уже был дан способ пересчета:

$$P_a = P_s \frac{\frac{\beta}{\varepsilon_2} + (1 - \beta)}{\frac{\beta}{\varepsilon_1} + (1 - \beta)} \quad (283)$$

Однако для него необходимо знание T , T_0 и т. д. Так как такие пересчеты весьма приблизительны, то можно учесть лишь род двигателя.

Для этого учета вводится коэффициент распределения потерь

$$\alpha = \frac{k}{v}.$$

Пусть при некоторой продолжительности включения α_1 мощность двигателя будет P_{α_1} . Требуется найти эквивалентную мощность P_{α_2} при другом стандартном режиме α_2 . Очевидно, что двигатель во втором случае может быть нагружен иным током. Пусть $P_{\alpha_2} = y P_{\alpha_1}$. С другой стороны, при y -кратной нагрузке потери выразятся через:

$$W = k + \frac{k}{\alpha} y^2. *)$$

Если электродвигатель должен одинаково нагреться и в том и в другом случае, то приблизительно будет иметь место равенство:

$$\left(k + \frac{k}{\alpha}\right) \alpha_1 = \left(k + \frac{k}{\alpha} y^2\right) \alpha_2,$$

откуда имеем для искомого коэффициента y :

$$y = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \alpha_1 + \alpha_1 - \alpha \alpha_2}{\alpha_2}}. \quad (298)$$

Обратно, если по каталогу двигатель предлагается для мощности P_1 (например 11 kW) при $\alpha_1 = 0,40$, то при некотором другом режиме $\alpha_2 = 0,30$ он может быть нагружен в y раз большей нагрузкой. Если имеется в виду, например, тихоходный серийс-двигатель, у которого $\alpha = 0,5$, то

$$y = \sqrt{\frac{0,5 - 0,4 + 0,4 - 0,5 \cdot 0,3}{0,3}} = 1,225,$$

откуда

$$P_{\alpha_2} = y P_{\alpha_1} = 1,225 \cdot 11 = 13,5 \text{ kW}.$$

Поправка по ур-нию (298) приобретает особый смысл, когда дело идет о двигателях с высокими постоянными потерями.

Пример. В качестве иллюстрации к сказанному приведем конкретный пример из области крановых установок.

Положим, требуется найти мощность электродвигателя для трехтонного крана, предназначенного для переноски болванок. Скорость передвижения крана должна равняться 120 м/мин или 2 м/сек. Диаметр оси колес определен из механического расчета в 120 мм; диаметр колес в 700 мм. Собственный вес крана равен 30 т.

Мощность, необходимая для преодоления сопротивления от трения при передвижении, найдется из формулы:

$$P = \frac{G \cdot f_r \cdot v}{102 \cdot r \cdot \eta} + \frac{G \mu_r \frac{d}{2} v}{102 \cdot r \cdot \eta} =$$

$$= \frac{33000 \cdot 0,08 \cdot 2}{102 \cdot 35 \cdot 0,6} + \frac{33000 \cdot 0,1 \cdot 6,2}{102 \cdot 35 \cdot 0,6} = 2,5 + 18,5 = 21 \text{ kW},$$

*) Считаю, что постоянные потери останутся те же, что допустимо, имея в виду, что величина y не очень сильно отличается от единицы.

где f_r — коэффициент трения при качении, μ — коэффициент трения при скольжении, r — радиус колес: $\frac{70}{2} = 35$ см; d — диаметр оси: 120 мм $= 12$ см.

Работа такого крана довольно напряженная и по наблюдению может быть охарактеризована коэффициентом $\alpha = 0,30$. Нагрузка полная, так как главную роль играет вес самого крана.

Массы велики, и их надо учесть; также необходимо учесть и якорь. В учет этого возьмем электродвигатель в 32 kW при 650 об/мин. Его

$$GD^2 = 16,5 \text{ kgm}^2;$$

принимая во внимание зубчатую передачу, получим, что общий GD^2 будет $16,8 \text{ kgm}^2$.

Необходимый момент, если исходить из расчетной мощности $P = 21$ kW:

$$M = 975 \frac{P}{n} = 975 \frac{21}{650} = 31,5 \text{ kgm}.$$

Допускаем пусковой момент $M_A = 2M_{\text{ном}}$, т. е. для преодоления масс имеем в распоряжении $31,5 \text{ kgm}$ избыточного момента (M_b).

Тогда t_b определится из следующего выражения (ур-ние 12):

$$\begin{aligned} t_b &= \frac{GD^2 n}{375 \cdot M_b} + \frac{0,975 \cdot G \cdot v^2}{M_b \cdot n} = \\ &= \frac{16,8 \cdot 650}{375 \cdot 31,5} + \frac{0,975 \cdot 33000 \cdot 2^2}{31,5 \cdot 650} = 0,95 + 6,3 = 7,25 \text{ сек.} \end{aligned}$$

За неимением точных данных, допустим по таблице число включений h в 1 час $= 60$, т. е. продолжительность цикла $t_s = \frac{3600}{60} = 60$ сек. При $\alpha = 0,3$ получим продолжительность периода работы $t_a = 0,3 \cdot 60 = 18$ сек., из которого $t_b = 7,25$ сек.

Таким образом имеем, что $18 - 7,25 = 10,75$ сек. необходимо на установившийся ход (t_s).

Повышенная в учет „тепла ускорения“ мощность [по ур-нию (297)]

$$P_s = P_s \sqrt{\frac{(x^2 - 1) t_b}{t_s + t_b} + 1} = 21 \sqrt{\frac{(2^2 - 1) \cdot 7,25}{18} + 1} = 31,8 \text{ kW},$$

где

$$x = \frac{M_A}{M_{\text{ном}}} = 2.$$

Как видим, полученная мощность близка к ориентировочно принятой 32 kW.

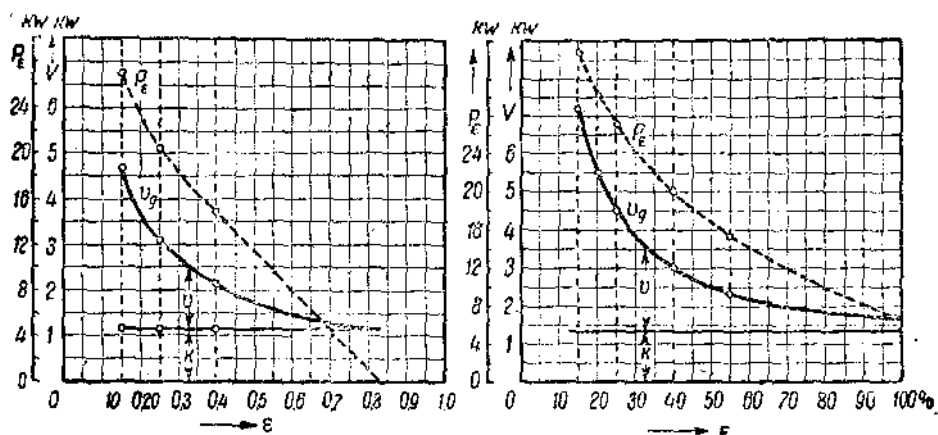
Теперь ищем подходящую величину двигателя (марку) по каталогу. Так как последний не содержит $\alpha = 0,30$, а ближайшее к нему $\alpha = 0,25$, то, предвидя тихоходный серийс-двигатель постоянного тока, для кото-

рого $\alpha = 0,5$, произведем пересчет [по ур-нию (298)]:

$$y = \sqrt{\frac{\alpha z_1 + \varepsilon_1 - \alpha \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 0,3 + 0,3 - 0,5 \cdot 0,25}{0,25}} = 1,185,$$

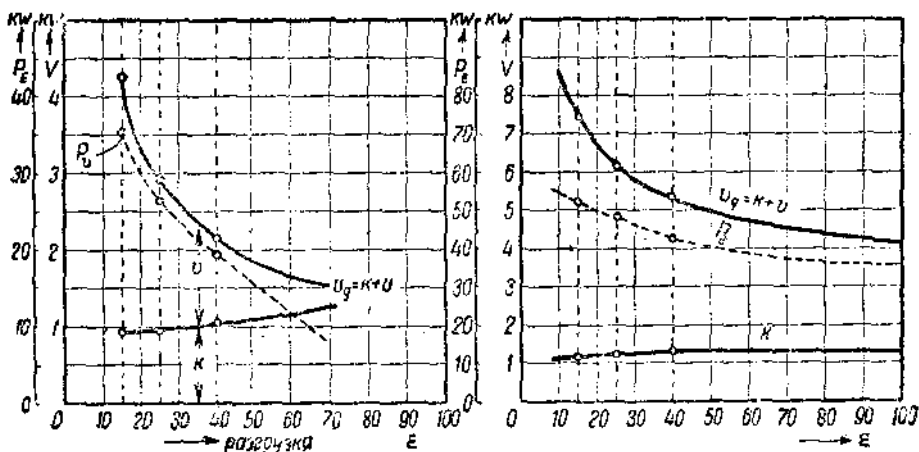
откуда

$$P_{e_1} = y \cdot P_{e_2} = 1,185 \cdot 31,8 = 37,5 \text{ kW}.$$



Фиг. 331.

Однако, если взять электродвигатель с большими постоянными потерями ($\alpha = 1-2$) по каталогу для $\varepsilon_1 = 0,25$ и определить его мощность для непрерывной работы, т. е. $\varepsilon_2 = 1,0$, то подкоренное количество окажется отрицательным, откуда следует, что подобные двигатели, специально спроектированные для прерывистой работы, не могут работать длительно.



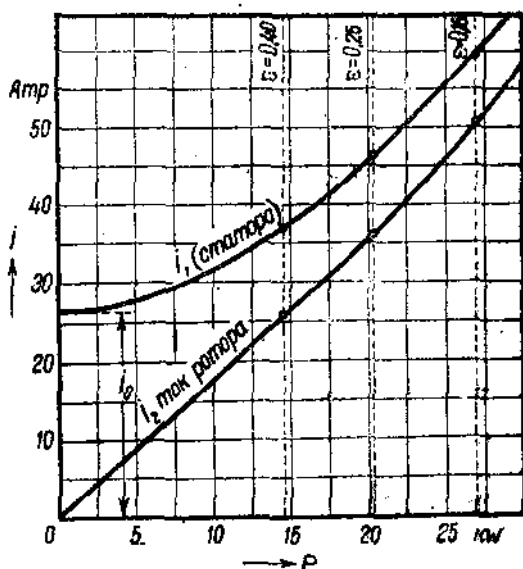
Фиг. 332.

Такое явление имеет место в действительности с крановыми асинхронными двигателями специальной конструкции с усиленным между-железным пространством. Намагничивающий ток при малой нагрузке (дли-

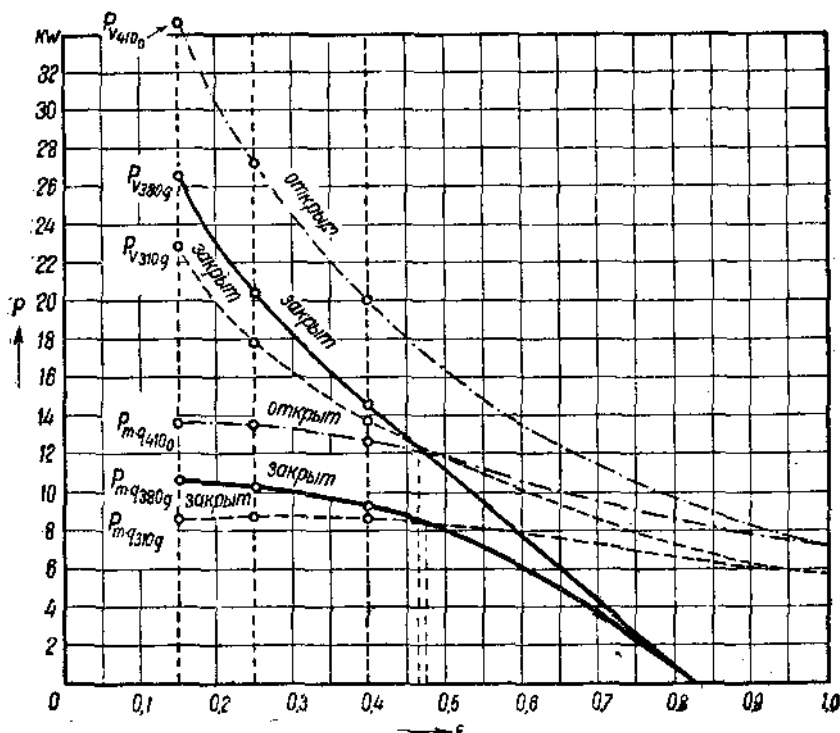
тельной) и малом $\cos \varphi$ оказывается так велик, что двигатель не выдерживает длительной работы.

Распределение потерь в таких специальных крановых двигателях в зависимости от нагрузки, или, что то же, от коэффициента включения ε , представлено на фиг. 331 для закрытого (слева) и открытого кранового асинхронного двигателя, а на фиг. 332 для закрытого (слева) и открытого сериес-двигателя в 500 В. Пунктирными линиями указана прерывистая мощность этих двигателей для различных ε , причем относительный рост постоянных потерь и падения P_0 особенно резко проявляется для закрытого асинхронного двигателя с большим междуфазным пространством и большим намагничивающим током I_0 (фиг. 333).

На фиг. 334 представлено действительное отношение прерывистой мощности к средней квадратичной для открытого и закрытого асинхронного

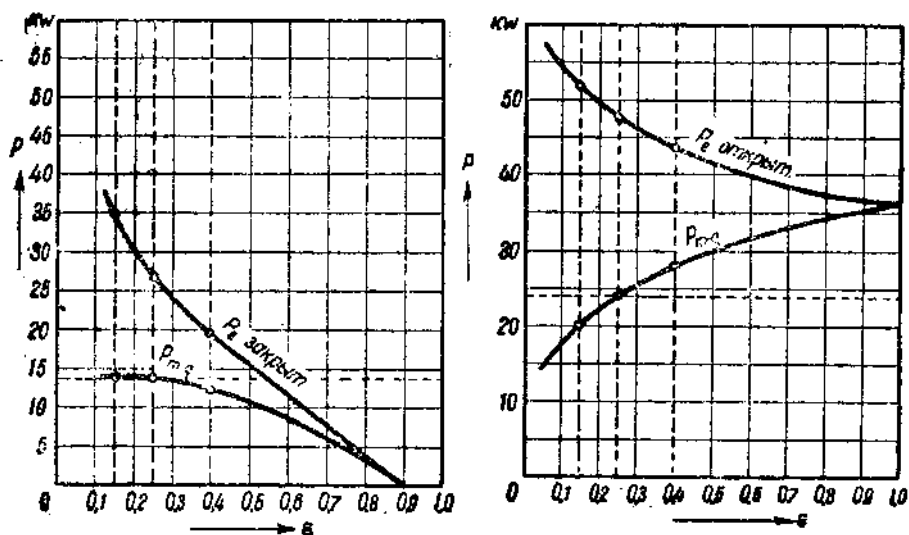


Фиг. 333.



Фиг. 334.

кранового двигателя. Падение мощности P_e при увеличении длительности работы наблюдается наиболее резко у закрытого асинхронного двигателя нормального напряжения 380 В (см. кривые жирными линиями). При $\alpha = 0,83$ двигатель уже не может произвести никакой полезной работы, так как одни потери холостого хода (намагничивания) нагревают двигатель до нормальной температуры. Если уменьшить магнитный поток, переключив двигатель на пониженное напряжение 310 В, то потери холостого хода понижаются, и пунктирные кривые $P_{e(310\text{ В})}$ и $P_{m.q(310\text{ В})}$ показывают, что тот же двигатель может работать длительно, развивая около 6 кВт. Если, наконец, тот же самый двигатель превратить в открытый, сняв крышки на боковых щитках, то теплоотдача значительно увеличится. Если при этом для увеличения пускового момента двигатель подключить к повышенному напряжению 410 В, то, несмотря на увеличенные постоянные (магнитные) потери,



Фиг. 335.

он может развить около 8 кВт длительно, как показывают соответствующие кривые P_e и $P_{m.q}$. Отношение P_e и $P_{m.q}$ для закрытого и открытого серийного двигателя видно из фиг. 335.

Итак, пересчет мощностей для различных, резко отличающихся режимов надо производить с некоторой осторожностью, тем более что одним коэффициентом α влияние различных типов нельзя учесть. Достаточно вспомнить кривую влияния α на коэффициент теплоотдачи μ (фиг. 310).

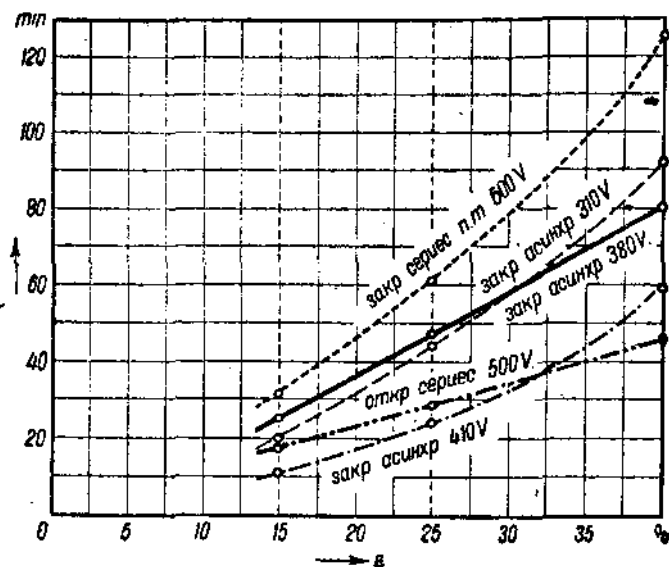
§ 11. Сравнение двух способов выбора двигателя по каталогам „временных“ и повторно-кратковременных „прерывистых“ мощностей.

При всей своей приблизительности способ выбора двигателя по „прерывистой“ мощности, основанный на громадном фирменном опыте в области электропривода подъемных механизмов

с прерывистой работой, хотя и имеет указанные уже ограничения в применении, тем не менее представляет громадный шаг вперед по сравнению с вышеизложенным способом „временных“ мощностей.

Для сравнительной оценки их и выявления тех ошибок, которые может дать выбор временной мощности при прерывистой работе можно привести фиг. 336 и табл. 78 и 79, из которых видно, насколько соотношение временных и прерывистых мощностей индивидуально и зависит от рода и типа двигателей.

Если для исследованных ранее электродвигателей (асинхронных и сериес) найти „временные мощности“, т. е. время, которое соответствует прерывистой мощности при $\varepsilon = 0,15—0,40$, то получаются чрезвычайно различные цифры минут, в течение которых эти мощности могут быть выдержаны под непрерывной нагрузкой. Так, из фиг. 331 и табл. 78 явствует, что одному и тому же



Фиг. 336.

режиму $\varepsilon = 0,15$ соответствует: в закрытом асинхронном двигателе 25 минутная мощность (27 kW), а в открытом — 11-минутная мощность (35 kW). Другому режиму $\varepsilon = 0,40$ в тех же двух двигателях соответствует: в закрытом типе — 81-минутная мощность (14,8 kW), а в открытом — 57-минутная мощность (20 kW).

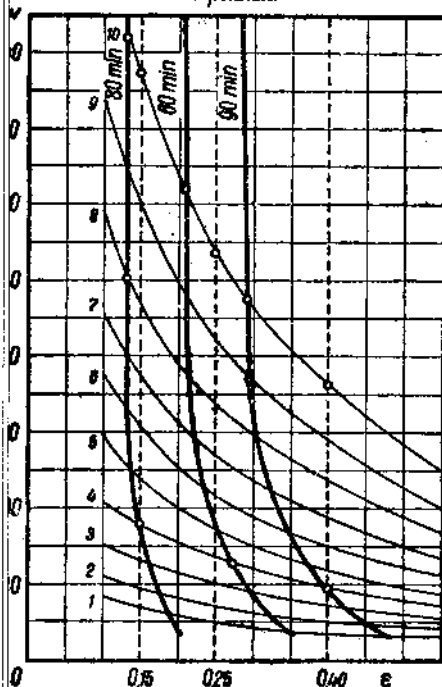
Разница еще больше для сериес-двигателя постоянного тока: при режиме $\varepsilon = 0,15$: в закрытом типе — 32-минутная мощность (фиг. 332) 35 kW; в открытом — 18-минутная мощность 52 kW; при режиме $\varepsilon = 0,40$: в закрытом типе 126-минутная мощность 20 kW, а в открытом — 46-минутная мощность 43 kW.

Итак, совершенно недопустимо при прерывистой работе исходить из стандартных „минут“, так как одному и тому же режиму прерывистой работы соответствует различное число минут непрерывной работы для различного рода и типа двигателей. Кроме того влияет и величина (мощность) двигателей: при сравнении данных из ката-

ТАБЛИЦА 78.

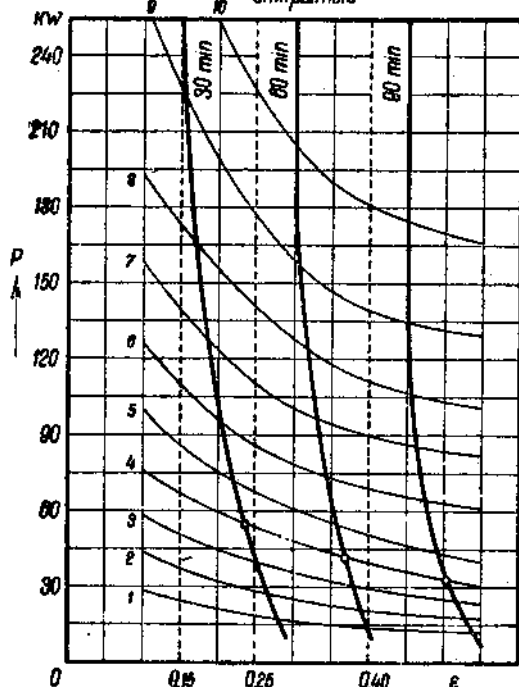
	Трехфазный асинхронный двигатель						Сервис-двигатель постоянного тока			
	Закрытый 380 V		Закрытый 310 V		Открытый 410 V		Закрытый		Открытый	
	kW	мин.	kW	мин.	kW	мин.	kW	мин.	kW	мин.
0,15	27	25	22,8	20	35	11	35	32	51,8	18
0,20	23	36	20,4	30	30,5	17	30,3	45	49,4	23
0,25	20,2	47	17,9	45	27	24	27	61	47,5	29
0,30	18,4	58	16,3	60	24,3	33	24,5	78	45,6	35
0,35	16,6	70	14,9	77	22,1	45	21,8	99	44,1	40
0,40	14,8	81	13,7	93	20	57	20	126	43,2	46

закрытый



Фиг. 337а.

открытый



Фиг. 337б.

лога крановых двигателей АЕГ для временных и прерывистых мощностей оказывается, что малый или открытый двигатель определенной временной мощности годен для большего значения ϵ , чем большой и закрытый, так как малый двигатель имеет большую поверхность на единицу объема и большую теплоотдачу A . Чертеж фиг. 337 это подтверждает: точки пересечения трех пунктирных прямых 0,15, 0,25 и 0,40 с пучком тонко начерченных кривых

(каждая из которых относится к определенной величине трехфазного кранового мотора) дают прерывистые мощности при $\varepsilon = 0,15, 0,25$ и $0,40$ (например для X -величины

$$P_{\varepsilon 0,40} = 109 \text{ kW}; P_{\varepsilon 0,25} = 160 \text{ kW}; P_{\varepsilon 0,15} = 232 \text{ kW}),$$

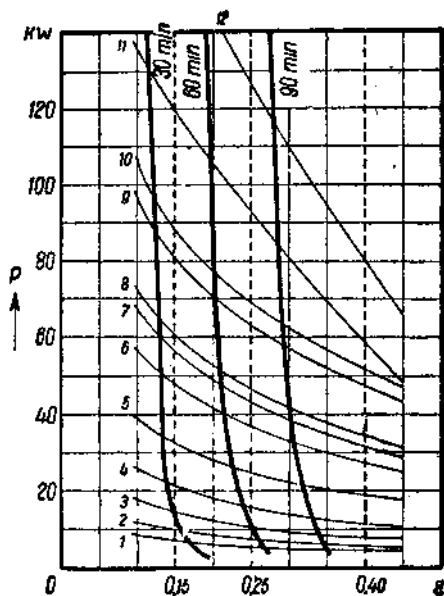
в то время как точки пересечения трех жирно прочерченных кривых с пучком дают 30-, 60- и 90-минутную мощность для каждой величины мотора (например X -величина дает $P_{30} = 145 \text{ kW}$, $P_{60} = 187 \text{ kW}$ и $P_{90} = 250 \text{ kW}$). Фиг. 338 дает такие же взаимоотношения для закрытого серийного мотора (типа WDH-AEG).

В виду того, что закрытые асинхронные двигатели специальной конструкции (для тяжелой работы, т. е. высокой перегрузки, с большим насыщением при большом междужелезном пространстве) непригодны для тяжелой по режиму ε работы, между тем как в металлургических заводах коэффициент включения ε обычно превышает $0,40$ ($0,5 - 0,75$), фирма Сименс-Шуккерт в последней модели таких двигателей ввела добавочную обмотку „Hüttenwicklung“ (см. S. Zeitschrift, 1930, № 12), включаемую при ε , большем $0,5$.

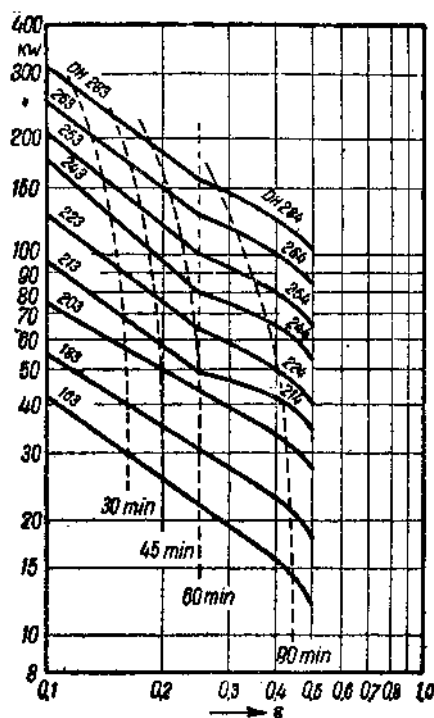
На фиг. 339а действие этой обмотки видно из кривых, относящихся к типам от DH-284 до DH-214, а именно она увеличивает отдаваемую длительную мощность: кривые не так круто падают к оси абсцисс, начиная с $\varepsilon = 0,30$.

Фиг. 339b показывает, что металлургические двигатели закрытые с охлаждаемым кожухом типа hoP более пригодны для тяжелой по режиму ε работы, чем обычные закрытые, так как кривые идут более полого. Недостаток их — меньшая теплоотдача при пуске и торможении (замедленной скорости и вентиляции) — не так существен, потому что он проявляется в меньшей степени, чем у открытых двигателей. По опытным измерениям отводимое количество тепла в двигателях типа hoP уменьшается в отношении корня третьей степени понижения скорости. Например, при остановке поверхность таких двигателей, увеличенная ребрами, отдает еще $50-60\%$ тепла, отводимого при полной скорости (закрытые двигатели отдают около 80%).

Фиг. 340 дает сравнение мощностей различных типов (открытых и закрытых) трехфазных крановых моторов AEG-DHK одной и той же величины: налево представлена мощность в зависимости от ε , направо — в зависимости от минут (времени непрерывной



Фиг. 338.



телем закрытого типа только при режиме $\epsilon = 0,18$, а открытым — при $\epsilon = 0,29$; или иначе, при $\epsilon = 0,18$ открытый двигатель дает мощность на 25% большую.

Следовательно, при совершенно одинаковой обмотке путем снятия крышек на боковых щитах нельзя получить никакого увеличения 30-минутной мощности, тогда как при прерывистой работе с режимом $\epsilon = 0,18$ этим путем мощность увеличится на 25%. Причина в том, что снятие крышек существенно увеличивает излучающую поверхность и теплоотдачу A , а последнее обстоятельство сказывается только на длительной мощности, т. е. работе в течение многих часов (хотя бы прерывистой), но не на кратковременной, где влияет C , а не A .

Интересно еще раз вернуться к сравнению мощности одного типа электродвигателя (закрытого), но разного рода — постоянного тока и асинхронного. В табл. 79 сравниваются два закрытых двигателя с приблизительно одинаковым моментом при $\epsilon = 0,25$: прерывистая мощность асинхронного двигателя на 12% больше, чем постоянного тока ($\frac{40}{36,5} = 1,12$), а часовая мощность на 4% меньше, чем постоянного тока ($\frac{35}{37,5} = 0,97$).

ТАБЛИЦА 79.

Род тока	Тип двигателя	$\epsilon = 0,25$		M kgm	60-минутная мощность P kW
		P, kW	n		
Трехфазный	DNK-18/754	40	735	53	35
Постоянный	WDH-104	36,5	680	52,3	37,

Объясняется это тем, что потери асинхронного двигателя главным образом в статоре, а двигателя постоянного тока — главным образом в якоре, и тепло удаляется быстрее в асинхронном двигателе, т. е. длительная прерывистая мощность асинхронного двигателя больше, так как A больше.

Это различие в работе влияет на проектирование электродвигателей. Если, например, закрытый серийный двигатель спроектирован для часовой мощности, т. е. после 1 часа непрерывной работы он нагревается во всех частях до нормы, то, пущенный в прерывистую работу (продолжительную), например с режимом $\epsilon = 0,25$ на ту же мощность, он нагреется неравномерно, и по большей части (по крайней мере для больших моделей) индукторные обмотки его будут недогреты при нормально нагретой якорной.

Таким образом двигатель, предназначенный для прерывистой работы, может иметь более тонкую обмотку индукторов или при том же объеме большее количество витков, т. е. при увеличенном потоке он будет иметь меньшую скорость, но больший момент (при постоянной мощности).

Фирма AEG дает нижеследующую таблицу (80) для крановых двигателей с одинаковыми якорями, но различными обмотками индукторов (значок *v* относится к усиленной обмотке индукторов):

ТАБЛИЦА 80.

Тип двигателя	Прерывистая мощность P_e						Временная мощность					
	$\varepsilon = 0,15$		$\varepsilon = 0,25$		$\varepsilon = 0,40$		30 мин.		60 мин.		90 мин.	
	kW	n	kW	n	kW	n	kW	n	kW	n	kW	n
WDHV-126	103	630	78	690	52	830	110	620	85	680	72	710
WDH-126	103	680	78	770	52	980	125	640	90	720	74	800

§ 12. Способ выбора мощности по специальным таблицам, составленным для определенных типов двигателей (закрытых крановых) определенными фирмами.

Как разновидность способа выбора прерывистой мощности можно для полноты обзора привести еще табл. 81, 82 и 83, составленные фирмой Сименс-Шуккерт для различных типов крановых двигателей.

а) Закрытые двигатели постоянного тока. Пересчет производят, исходя из положения, что количество тепла, развиваемое в двигателе, не превосходит того количества, которое может быть отдано через поверхность двигателя в окружающую среду. Это тепловое равновесие может быть представлено равенством:

$$A = (i_{m,q}^2 + B) \varepsilon + C \cdot m \cdot z,$$

где

A — постоянная, выражающая количество тепла, которое может быть отдано двигателем в окружающую среду;

B — постоянная, характеризующая потери в железе;

C — величина, характеризующая добавочный нагрев пусковым током.

Эти три величины устанавливаются при испытании двигателя и приведены в таблицах.

ε — продолжительность включения;

m — число пусков в течение одного полного цикла (периоды работы двигателя тормозом, когда двигатель разгоняется грузом, не считаются);

z — число циклов за 1 час;

$mz = h$;

$i_{m,q}$ — средний квадратичный ток.

Пример. Грейфер весом 2 т емкостью на 2 т угля. Производительность 60 т в час.

$$\text{Число циклов за 1 час } z = \frac{60}{2} = 30.$$

Учитывая непредвиденные задержки, необходимо было бы принять большее число циклов, но, принимая во внимание, что двигатель во время задержки сможет охлаждаться больше, чем при нормальной работе, можно заставлять его в критических случаях работать более интенсивно.

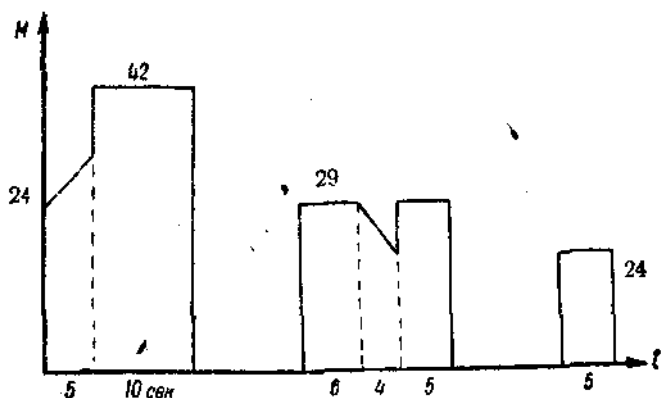
Время одного цикла $t_c = \frac{3600}{30} = 120$ сек.; из них рабочее время составляет 35 сек. согласно графику (фиг. 341).

Скорость подъема грейфера $v = 0,5$ м/сек, к. п. д. передачи = 0,75:

$$P = \frac{4000 \cdot 0,5}{102 \cdot 0,75} = 26 \text{ kW при } 600 \text{ об/мин,}$$

$$M = 975 \frac{P}{n} = \frac{975 \cdot 26}{600} = 42 \text{ kgm.}$$

Продолжительность включения $\epsilon = \frac{35}{120} = 0,29$ или 29%.



Фиг. 341.

Из табл. 82 получаем для двигателя GH-260d для напряжения 440 V:

$\epsilon = 0,25$, $P = 30$ kW, $n = 570$, $M = 52$ kgm, $i = 78,5$ A;

$\epsilon = 0,40$, $P = 22$ kW, $n = 670$, $M = 32$ kgm, $i = 58,0$ A.

Необходимая мощность 26 kW при $\epsilon = 0,29$. Установим, достаточен ли для этого режима взятый тип GH-260d.

По построенной из данных каталога характеристике двигателя получаем для цикла при условии $\epsilon = 0,25$, т. е. 25%:

M kgm	24	29	42	29	18	29	24
M в долях норм.	0,46	0,56	0,80	0,56	0,35	0,56	0,46
i в долях норм.	0,60	0,66	1,00	0,66	0,53	0,66	0,60

По ур-нию (244) эквивалентный ток:

$$i_{m.q} = i_{0,25} \sqrt{\frac{2 + 10 + 2,64 + 1,43 + 2,2 + 1,8}{5 + 10 + 6 + 4 + 5 + 5}} = i_{0,25} 0,757 = 59,4 \text{ A.}$$

Для двигателя GH-260d (табл. 82);

ТАБЛИЦА 81.

Сервис-моторы (постоянный ток 220 В), завода С.-Шуккерт в Германии

OH Т	Выполнение	n = 1500					n = 2500					n = 4000					Постоянные мотора				CD*	kg/m³		
		кВт	А	Ток	Число об/мин	Момент вращ.	Коеф. полез. дейст.	кВт	А	Ток	Число об/мин	Момент вращ.	Коеф. полез. дейст.	кВт	А	Ток	Число об/мин	Момент вращ.	Коеф. полез. дейст.	24 часа			8 часов	В
62	a	3	18,9	545	5,4	72,5	78	2,4	14,4	635	3,7	76	76	1,9	11	730	2,5	78,5	56	61	16,5	0,04	0,25	
	b	4,4	27	785	5,5	74	77	3,5	20,3	915	3,8	77	77,5	2,6	15,3	1050	2,5	77,5	120	128	87	0,11		
	c	5,8	33,7	995	5,6	78,5	81,5	4,5	25,1	1150	3,9	81,5	81,5	3,3	18,4	1325	2,4	81,5	196	207	131	0,17		
82	a	4,4	25,4	600	7,1	76	79,5	3,5	20	685	4,9	79,5	79,5	2,7	15,2	800	3,2	80,5	113	123	45,2	0,122	0,5	
	b	5,7	33,4	765	7,2	77,5	80	4,4	25	870	4,9	80	80	3,3	18,6	1005	3,2	80,5	188	205	107	0,21		
	c	7,6	42	1075	6,9	82,5	85,5	5,8	30,8	1225	4,6	85,5	85,5	4,2	22,6	1405	2,9	84,6	318	338	254	0,45		
122	a	6,6	38,5	550	11,7	78	82,5	5,3	29,2	625	8,2	82,5	82,5	4,1	22,4	715	5,6	83	238	268	92	0,2	0,7	
	b	9,5	52,7	755	12,3	82	86,5	7,3	38,6	865	8,2	86	86,5	5,6	29,4	940	5,6	86,5	460	510	269	0,42		
	c	10,8	59	985	10,7	83,5	86,5	8,3	43,5	1120	7,2	86,5	86,5	6,1	32	1275	4,7	86,5	620	680	480	0,85		
160	a	7,6	42,8	495	15	80,5	80	6	34	565	10,3	80	80	4,6	24,6	635	7	85	294	327	129	0,303	1,3	
	b	10,7	56,9	685	15,3	85,5	86,5	8	42,2	755	10,3	86,5	86,5	6	31,8	845	6,9	86	542	605	354	0,56		
	c	12,1	65,3	885	13,4	84,5	85	9	48	990	8,9	85	85	6,5	35	1125	6,7	84,5	750	845	580	0,88		
191	a	12,3	71,3	445	27	78,5	83,5	9,9	54	515	18,7	83,5	83,5	7,6	41	585	12,7	84,5	835	965	440	1,38	3,5	
	b	15,2	82,7	590	25,1	83,5	86,5	11,7	62	670	17	86	86,5	8,8	46,7	760	11,2	85,5	1185	1350	710	2,5		
	c	19,5	105,5	690	21,4	84	87	14,6	77	785	18,2	86,5	86,5	10,5	53	885	11,6	85	1950	2240	1690	3,23		
241	a	18,4	105	450	40	80	80	14,3	77	515	27	84,5	84,5	10,8	60	585	18	82	1780	2070	986	0,29	6,0	
	b	25,8	136	570	44,3	86,5	86,5	19,3	100	640	29,5	87,5	87,5	14	74,5	730	18,8	85,5	3300	3870	2510	4,7		
	c	30	157	710	41,8	87	87	21,2	111	790	26,2	87	87	14,7	78,5	920	15,6	86	4670	5400	4720	7,5		
250	a	26,5	141	430	60	85,5	85,5	19,9	106	490	39,5	85,5	85,5	14,9	80	570	25,5	84,5	3450	3970	1830	6,05	9,5	
	b	33,2	170	540	61	89	89	24,3	125	600	39,5	88,5	88,5	17,7	93	690	25	86,5	5130	6120	3720	10,2		
	c	41	203	685	58	90,5	90,5	29	147	760	37	89,5	89,5	20	106	870	22,5	86	7920	9000	7880	15,9		
360	a	33	173	375	85	87	87,5	25	130	420	53,5	87,5	87,5	18,7	99	500	36,5	86	5040	6050	2520	9,2	17	
	b	41	213	495	81	87,5	87,5	30	157	555	53	87	87,5	22	117	655	33,5	85,5	8070	9900	5380	17,7		
	c	47	242	605	76	88,5	88,5	36	187	670	53	87,5	87,5	26	139	760	33,5	85	12950	15100	12300	24,2		
270	a	49	255	405	118	87,5	87,5	36,5	189	470	76	88	88,5	27	142	550	48	86,5	11500	14100	7850	23,1	25	
	b	66	330	530	122	91	91	46	236	595	75	88,5	88,5	32,3	171	700	45	86	20500	24500	20100	37,4		
	c	74	376	400	180	89,5	89,5	54	274	455	116	89,5	89,5	39	203	535	71	87,5	27800	31500	20400	59		
280	a	89	440	485	179	92	92	62	311	545	110	90,5	90,5	44	227	645	66	88	37800	45200	39400	74	45	
	b	95	477	335	275	90,5	90,5	69	355	385	175	90	90,5	51	265	455	108	87,5	41500	52800	32800	79		
	c	114	565	410	270	92	92	79	405	460	167	88,5	88,5	56	294	559	99	86,5	60200	72500	59700	122		

ТАБЛИЦА 82.

Сервис-моторы постоянный ток 440 В; завода С-Шукерт в Германии

Модель	Выполнение	n = 15%						n = 25%						n = 40%						Постоянные мотора				CD ¹ kgm ²
		Ток			Число об/мин	Момент вращ. М	Кэф. полез. действ. %	Ток			Число об/мин	Момент вращ. М	Кэф. полез. действ. %	Ток			Число об/мин	Момент вращ. М	Кэф. полез. действ. %	24 часа		в час		
		Мощн. kW	A	B				Мощн. kW	A	B				Мощн. kW	A	B				Мощн. kW	A	B	Мощн. kW	
62	a	2,7	9	550	4,8	68,5	3,3	2,2	6,8	640	3,3	73,5	1,7	5,3	740	2,2	73	12,7	13,4	5,7	0,03			
	b	3,8	12	805	4,7	72	3,2	3,1	9	940	3,2	78,5	2,3	8,8	1080	2,1	77	23	24,5	10,5	0,027			
	c	5,2	15,6	1115	4,5	76	3,1	81	11,5	1290	3,1	81	2,9	8,4	1490	1,9	75,5	42,5	42,5	31	0,043			
82	a	4,3	13	690	6,2	75	4,2	3,4	9,8	985	4,2	79	2,6	7,4	910	2,8	80	27,3	29	11,5	0,030			
	b	5,6	16,1	890	6,2	79	4,1	5,1	11,9	1025	4,1	82	3,3	9,1	1170	2,7	82,5	46	46	25,5	0,033			
	c	6,8	19	1210	5,5	81,5	3,6	83	14	1380	3,6	83	3,6	10,1	1620	2,2	81	65	66,5	47	0,112			
122	a	6,6	18,5	650	8,1	81	6,8	5,2	14,2	740	6,8	83	4	10,8	855	4,5	84	56	62	18	0,08			
	b	9,1	24,8	870	10,1	83,5	6,9	85,5	18,6	930	6,9	85,5	5,3	14,1	1135	4,6	85,5	105	116	57	0,105			
	c	11	29,5	1105	9,7	85	6,5	86,5	22	1250	6,5	86,5	6	16	1440	4,1	85,5	160	170	126	0,186			
160	a	7	19,8	580	12,1	86,5	8,3	5,4	15	635	8,3	87,5	4,2	11,4	725	5,6	83,5	63	70	25	0,075			
	b	9,6	26,2	755	12,4	83,5	8,4	85	19,5	850	8,4	84,5	5,4	14,5	970	5,4	84,5	116	129	71	0,14			
	c	11,7	32	970	11,8	83	7,9	85	23,5	1080	7,9	85	6,2	17	1235	4,9	83	181	200	147	0,22			
191	a	10,5	30,2	605	20,2	79	13,8	8,2	22,7	580	13,8	82	6,2	17,3	665	9,1	81,5	150	170	65	0,344			
	b	15,1	41	680	22,6	83,5	15,3	85	30,7	735	15,3	85	8,3	23	630	9,8	82	240	320	186	0,62			
	c	18,5	49,3	810	22,2	85,5	14,6	90	34,6	915	14,6	90	9,8	26,2	1035	9,2	84,5	430	480	360	0,805			
241	a	18	51	470	37,5	80,5	25,3	13,9	38	535	25,3	83,5	10,5	28,5	670	16,2	87	470	550	218	0,78			
	b	23	63	600	37,5	83	24,5	17,2	47	685	24,5	83,5	12,2	34	785	15	81	810	940	610	1,17			
	c	28,5	73	810	34,2	89	22	20,5	53	910	22	88	14	37	1080	12,5	86	1050	1220	974	1,87			
250	a	24,5	66	455	53	84,5	35	18,7	50	520	35	85	14	37	615	22	86	740	875	333	1,51			
	b	31	81	555	55	87	36,5	23,4	60	625	36,5	88,5	17	44,5	730	22,5	87	1160	1380	785	2,51			
	c	38	96	745	50	88	32	27,4	71	835	32	88	19,2	51	985	19	85,5	1820	2070	1650	3,88			
260	a	30	81	390	76	84	51	23,3	61	450	51	87	17,7	46	530	32,5	87,5	1110	1340	515	2,29			
	b	42	106	505	80	86	52	30	78,5	570	52	87	22	58	670	32	86,5	1580	2280	1385	4,44			
	c	51	129	670	74	90	47	37	94	760	47	89,5	25	67	925	26,5	85	3130	3640	2530	6,1			
270	a	49	128	410	116	87	74	37	94	480	74	89,5	26,7	70	565	46	87	2860	3410	1955	5			
	b	63	157	585	105	91	65	44	113	690	65	88,5	31,2	82	790	38,5	86,5	4620	5550	4130	9,35			
	c	88	217	520	164	92	101	61	157	590	101	88,5	43	112	720	58	87,5	9340	11000	8720	18,5			
280	a	70	176	410	167	90,5	107	52	129	470	107	91,5	37,5	96	590	65	88	5580	6850	4020	14,8			
	b	88	217	520	164	92	101	61	157	590	101	88,5	43	112	720	58	87,5	9340	11000	8720	18,5			
	c	89	226	355	246	89,5	157	66	169	410	157	89	47,8	123	480	95	88,5	9400	11400	7000	19,7			
310	a	113	262	425	280	91	169	79	202	490	169	88	55,5	146	575	94	86,5	15050	18300	15000	30,5			
	b	113	262	425	280	91	169	79	202	490	169	88	55,5	146	575	94	86,5	15050	18300	15000	30,5			
	c	113	262	425	280	91	169	79	202	490	169	88	55,5	146	575	94	86,5	15050	18300	15000	30,5			

Закрытые крановые двигатели трехфазного переменного тока с контактными кольцами

Модель	$\epsilon = 15^\circ$						$\epsilon = 25^\circ$						$\epsilon = 40^\circ$						CD ² kgm ²
	Мощн.	Число об/мин	Момент М	$\frac{M_{max}}{M}$	Коэф. подем.	cos ϕ	Мощн.	Число об/мин	Момент М	$\frac{M_{max}}{M}$	Коэф. подем.	cos ϕ	Мощн.	Число об/мин	Момент М	$\frac{M_{max}}{M}$	Коэф. подем.	cos ϕ	
112 — 1500	11	1390	7,6	2	85	0,85	8	1425	5,45	2,8	86	0,83	4,8	1450	3,2	4,7	85	0,77	0,006
122 — 1500	12	1390	8,5	2	86	0,86	10	1425	6,3	2,5	86	0,84	4,8	1450	3,5	3,8	87	0,78	0,008
152 — 1500	15	1430	12,2	1,7	87	0,88	15	1445	8,9	2,4	88,5	0,97	10,5	1450	6,8	2	88,5	0,85	0,0012
112 — 1000	6	980	6,3	2,1	80	0,78	5	940	5,2	2,5	81,5	0,75	4	955	4,1	3,2	81,5	0,68	0,0004
122 — 1000	8	990	8,4	1,9	83	0,78	10	945	6,7	2,4	83	0,75	5	955	5,1	3,1	83,5	0,68	0,0005
132 — 1000	12	990	12	2,1	85	0,78	10	950	10,1	2,5	85	0,77	7	965	7	3,6	85	0,68	0,0005
152 — 1000	17	940	17	2,2	87	0,8	14	960	14	2,7	87	0,78	9,5	970	9,5	4	88	0,71	0,0007
162 — 1000	25	945	25,5	2	88,5	0,83	19	960	19,5	2,6	89	0,8	14,5	970	14,8	3,4	89	0,75	0,0008
182a — 1000	31	950	32	2	90	0,83	24	965	24,5	2,6	90	0,81	17	975	17	3,7	90	0,75	0,0009
182b — 1000	37	955	37	2	91	0,84	29	970	29	2,6	91	0,82	21	980	21	3,6	91	0,76	0,0009
202a — 1000	45	965	46	2	91,5	0,85	36	970	36	2,6	91,5	0,82	27	980	27	3,4	91	0,79	0,001
202b — 1000	53	955	53	2	92	0,86	41	970	41	2,5	92	0,83	32	980	32	3,3	92	0,8	0,001
222a — 1000	63	970	62	2	92	0,86	50	975	49	2,5	92	0,85	40	985	40	3,1	92	0,82	0,001
222b — 1000	77	970	79	2	92,5	0,87	60	975	59	2,6	92,5	0,85	43	985	43	3,6	92,5	0,81	0,0013
332 — 750	7,8	695	10,5	2	81,5	0,73	6	705	8,2	2,5	82	0,69	4,5	715	6,2	3,4	81,5	0,6	0,0004
452 — 750	15	710	21	2	84	0,75	11	720	14,9	2,8	85	0,7	7,5	730	10,5	4	83	0,58	0,0005
462 — 750	20	710	27,5	2	86	0,77	15	720	20,3	2,8	86	0,73	11	730	14,7	3,8	85	0,58	0,0006
182a — 750	26	710	35	2	87,5	0,8	20	720	27	2,6	88	0,77	13	730	17,7	4	87	0,7	0,0008
182b — 750	31	715	42	2	89	0,81	24	725	32	2,6	89	0,78	16	735	21,2	3,9	89	0,7	0,0008
202a — 750	38	720	50	2,1	90	0,83	28	735	37,5	2,7	90	0,8	20	735	26,5	3,9	90	0,74	0,0009
202b — 750	48	720	61	2	90,5	0,85	33	730	54	2,8	91	0,82	22	740	29	4,3	91	0,77	0,0009
222a — 750	57	725	76	2	91	0,85	40	730	67	2,7	91,5	0,83	34	740	39,5	3,8	91	0,74	0,0011
222b — 750	65	725	89	2	91,5	0,86	50	730	80	2,8	92	0,83	40	740	45	4,4	91,5	0,78	0,0012
242a — 750	85	730	114	2	92,5	0,86	60	735	92	2,9	92,5	0,84	46	740	53	4,6	91,5	0,77	0,0014
242b — 750	100	730	134	2	92,5	0,86	70	735	103	3,1	92,5	0,84	49	740	64	5	91	0,78	0,0014
262a — 750	115	735	152	2,1	92,5	0,87	78	740	133	3,1	92,5	0,84	55	745	73	5,7	91	0,78	0,0021
262b — 750	142	735	190	2,2	92,5	0,87	90	740	120	3,5	92	0,84	85	745	73	5,7	91	0,78	0,0022
152 — 600	10	565	17,3	2	81	0,64	8	575	13,6	2,5	82	0,61	5,5	580	9,3	3,8	73	0,5	0,0004
162 — 600	16	570	27,5	2	83	0,67	12,5	575	21,3	2,4	85	0,64	8	585	13,4	3,9	83,5	0,5	0,0004
182a — 600	21	575	35,5	2	86	0,68	16	580	27	2,5	86	0,65	11	585	18,3	3,8	85	0,5	0,0005
182b — 600	26	580	44	2	87	0,67	20	585	33,5	2,6	87	0,64	13	590	21,5	4	86	0,5	0,0006
202a — 600	33	580	55	2	88	0,67	25	585	42	2,6	88	0,66	15	590	25	4,4	87	0,5	0,0007
202b — 600	41	580	69	2	89	0,67	28	585	46,5	2,8	89	0,64	17	590	28,5	4,8	87	0,45	0,0007
222a — 600	52	580	87	2	91	0,72	37	585	61,5	3	91	0,66	26	590	43	4,3	90	0,5	0,0008
222b — 600	61	585	109	2	91	0,72	46	590	76	3,2	91	0,67	29	590	48	4,3	90	0,5	0,0008
242a — 600	70	585	116	2,2	92	0,77	50	590	83	3,1	91,5	0,68	33	595	51	5,5	89,5	0,55	0,001
242b — 600	83	585	152	2	92	0,77	60	590	99	3,1	91,5	0,68	44	595	55	5,5	89,5	0,55	0,001
262a — 600	112	590	185	2	92,5	0,82	85	595	124	3	92	0,71	53	595	72	5,2	91	0,6	0,0013
262b — 600	131	590	217	2,1	92,5	0,82	100	595	140	3,2	92	0,71	62	595	88	5,2	91	0,6	0,0013
282a — 600	143	590	255	2,6	93,5	0,74	110	595	181	3,4	93	0,7	70	595	103	6	91,5	0,55	0,002
282b — 600	160	595	284	3,3	93,5	0,72	130	595	214	4,1	93,5	0,7	70	595	117	7,5	92	0,55	0,0022

$$A \text{ (для 24-часового режима)} = 1980$$

$$B \text{ " 24 " " } = 1385$$

$$C \text{ " 24 " " } = 4,44$$

По диаграмме $m = 4$ (2 спуска и 2 подъема)

$$m \cdot z = 4 \cdot 30 = 120,$$

$$A_1 = (59,4^2 + 1385) 0,29 + 4,44 \cdot 120 = 1958.$$

Двигатель достаточен, так как $A_1 < A$.

б) Закрытые крановые двигатели переменного тока. Мощности, приведенные в таблице, рассчитаны на 6 циклов в час. Их приходится пересчитывать на действительный режим ε по уравнениям

$$P'_x = \frac{P_{x_1} - P_{x_2}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} (\varepsilon_2 - \varepsilon_x) + P_{x_2}, \quad (299)$$

$$P''_x = P'_x (1 - c \cdot z), \quad (300)$$

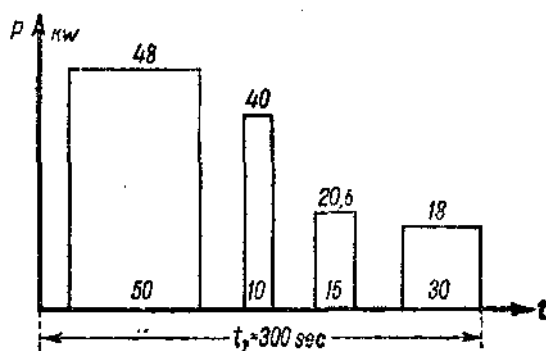
где ε_1 и ε_2 — какие-либо коэффициенты продолжительности включения (из табл. 83):

P_{x_1} и P_{x_2} — мощности при этих коэффициентах ε_1 и ε_2 ;

c — постоянная пусковых потерь;

z — число циклов.

Пример. Закрытый двигатель ($n = 720$ об/мин) работает по приведенной диаграмме (фиг. 342):



Фиг. 342.

$$\varepsilon = \frac{105}{300} = 0,35, \text{ т. е. } 35\%;$$

$$P_m = \sqrt{\frac{48^2 \cdot 50 + 40^2 \cdot 10 + 20,5^2 \cdot 15 + 18^2 \cdot 30}{105}} = 37,5 \text{ kW.}$$

Выбираем двигатель марки ДН-222б — 750 (табл. 83), развивающий при:

$$\varepsilon = 0,40 \dots \dots \dots 34 \text{ kW}$$

$$\varepsilon = 0,25 \dots \dots \dots 50 \text{ kW}$$

По формуле (299):

$$P'_x = \frac{50 - 34}{0,4 - 0,25} (0,4 - 0,35) + 34 = 39,3 \text{ kW}$$

при 6 циклах в час.

Двигатель же должен выдерживать $\frac{3600}{300} = 12$ циклов в час.

Изменение мощности при 12 циклах по ур-нию (300):

$$P_x'' = P_x' (1 - c \cdot z) = 39,3 (1 - 0,0012 \cdot 12) = 38,7 \text{ kW.}$$

Так как расчетная мощность $P_m = 37,5 \text{ kW}$ при $\epsilon = 0,35$ немного меньше P_x' при том же $\epsilon = 0,35$, то двигатель выбранной марки будет работать удовлетворительно.

Прежде чем перейти к основному вопросу „Теории электрического привода“ — к выбору системы привода, разберем еще смежный по содержанию с только что законченной главой вопрос о выборе вспомогательных элементов привода: реостатов и аппаратуры.

Выбор реостатов будет освещен главным образом в отношении тепловых свойств, аналогично установке предыдущей (VI) главы. Выбор аппаратуры не выделен в самостоятельную главу (как следовало бы ожидать по важности этого элемента электропривода) сознательно в виду того, что 1) пусковая аппаратура „ручного“ управления (контроллеры) вообще трудно отделима от реостатов, сливаясь иногда, например в жидкостных реостатах, в одно целое. „Автоматическая“ пусковая аппаратура рассмотрена в той мере, которую допускают рамки и без того разросшегося по сравнению с первым изданием труда. 2) Регулирующая же аппаратура представлена лишь в виде принципиальных схем, чем и естественно ограничиться в общем курсе. В виду громадной роли автоматизации производственных процессов в ближайшее время надо ожидать чрезвычайного развития конструирования автоматической аппаратуры пуска и регулирования скорости, и подробнейшему рассмотрению современных зарубежных конструкций автор предполагает отвести крупное место вготавливаемой им и его сотрудниками по кафедре серии специальных курсов по электрификации различных отраслей промышленности.

ВЫБОР РЕОСТАТОВ И АППАРАТУРЫ.

§ 1. Общие основания для выбора реостатов.

Изложенные в предыдущей главе методы определения прерывистой мощности двигателей непосредственно приложимы и к работе реостатов, по преимуществу кратковременной и прерывистой.

В отличие от двигателей пусковые реостаты рассчитываются исключительно на такую работу; однако знакомство с приведенной выше теорией совершенно необходимо как для расчета элементов сопротивления и их монтажа, так и для отчетливого понимания изменения их свойств при изменении условий работы, т. е. области применения тех или других типов реостатов.

Ограничиваясь здесь самым кратким указанием тех признаков, на которых можно базироваться в выборе типа реостата, мы неоднократно будем пользоваться данными предыдущей главы.

Из конструктивных деталей коснемся только тех, которые могут иметь значение при выборе. Интересующимся вопросами расчета и построения реостатов можно рекомендовать книгу E. Jasse, *Die Berechnung der Anlass und Regelwiderstände*, Berlin, I. Springer, 1924 и проф. В. С. Кулебакина, *Пусковые и регулирующие реостаты*.

Из трех классов, на которые можно подразделить все реостаты, а именно: пусковых, регулировочных и комбинированных, мы займемся здесь первым классом (пусковых реостатов) на том основании, что выбор их представляется более сложным по разнообразию условий работы и типов. *)

О регулировочных и комбинированных будет сказано несколько слов только попутно.

Каждый класс в свою очередь делится на группы по роду двигателя, для которого предназначен, и, следовательно, прежде всего по роду тока:

- 1) реостаты для серийных, шунтовых и компаундных двигателей постоянного тока;
- 2) реостаты для одно- и трехфазных двигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором или с кольцами и т. д.

*) Без пусковых реостатов могут быть пущены в ход:

1) В постоянном токе:

а) шунтовые двигатели при пуске холостую мощностью до 0,33 kW (пик тока до $10 I_{ном}$) напряжением не свыше 220 V;

б) серийные двигатели — при пуске под нагрузкой мощностью до 0,33 kW (пик тока до $2,5 I_{ном}$) для всяких напряжений, причем предохранители устанавливаются для шунтовых двигателей на тройной ток, для серийных — на двойной.

2) В трехфазном токе — короткозамкнутые двигатели, мощность которых ограничивается только местными условиями сети (см. главу X).

Наконец каждый реостат из любой группы может изготавливаться в различных видоизменениях по следующим признакам:

1. По числу ступеней, которыми обуславливается величина толчков тока в электрической сети и механических толчков в приводе, т. е. плавность пуска, а отчасти и продолжительность его (см. главу III). Таким образом можно различать реостаты для грубого и тонкого пуска. Наиболее тонкий пуск достигается жидкостными реостатами, где число ступеней в сущности бесконечно велико.

2. По направлению пуска: простые реостаты для пуска в одну сторону и реверсивные.

3. По роду приведения в действие: от руки или автоматически.

4. По роду выполнения: Каждый реостат ручного управления может иметь дополнительные механизмы в виде автоматического максимального или минимального выключения и механизма для обратного приведения реостата в пусковое положение. Последний механизм в комбинации с минимальным выключением приобретает особое значение в интересующих нас фабрично-заводских установках, где обычно в перерывы работы, даже короткие, обеденные, сеть выключается с центрального места (станции, подстанции), и если ручки простых реостатов, не выведенные своевременно в пусковое положение, остаются к моменту включения сети на положении „полного хода“, то неизбежным последствием будет перегорание предохранителей, а иногда и повреждение обмоток двигателей.

Если обратиться к каталогам, то увидим, что каждый тип реостата предлагается не менее как в трех видоизменениях; например, по Сименс-Шуккерт для постоянного тока

- тип „а“ — нормальное изготовление,
- „ „h“ — с автоматическим минимальным выключением,
- „ „i“ — с автоматическим максимальным и минимальным выключением,
- „ „р“ — с обратным приведением в пусковое положение,
- „ „h-р“ и „i-р“ — комбинированные,
- „ „п“ — с контактами,
- „ „f“ — для замедленного пуска и с искрогасителем (выше 100 kW),
- „ „q“ — с усиленным конечным контактом,
- „ „u“ — для регулировки вверх на 15, 50, 100 и 200%,
- „ „t“ — для регулировки вниз (с постоянным моментом),
- „ „v“ — для регулировки вниз (с переменным моментом).

Совершенно очевидно, что выбор класса, группы и даже подгруппы определяется сам собою тем родом тока, двигателя и характерными условиями работы, которые имеют место в данной установке.

Но реостат каждой подгруппы может иметь различное выполнение деталей, главным образом конструкции ступенчатого выключателя (плоского или цилиндрического), способа охлаждения (воздушного, масляного), отчасти типа и расположения элементов сопротивления и т. д., в зависимости от таких факторов, которые оказываются общими для всех реостатов и для всяких условий работы.

Скромной задачей этой главы и является выявление таких главных, общих всем типам признаков, которые могли бы быть положены в основание выбора размеров и деталей реостатов, будет ли это реостат для мотора постоянного или переменного тока, простой или реверсивный, ручной или автоматический и т. д.

Таковыми общими признаками можно считать: 1) пусковой ток, 2) продолжительность пуска, 3) частоту пуска.

Кроме этих трех главных признаков, далее, при описании типов реостатов будут указаны признаки „второго порядка“, например мощность двигателя; так, при выборе контроллеров для крановых двигателей (см. § 3), кроме частоты пуска, руководятся и мощностью. Наиболее простой и дешевый тип — со скользящими контактами — допускают обычно для частоты, не превышающей 120 включений в 1 час при мощности не выше 40—50 kW. При большей мощности и частоте приходится брать контроллеры кулачковые (фиг. 364) или с контакторным управлением (фиг. 365 и 366).

Пусковой ток зависит для данного двигателя от пускового момента сопротивления (статического и динамического), который, как известно, всегда может быть подсчитан для ответственных случаев; вообще же фактор этот учитывается выбором размеров намеченного типа реостата, так как каждый тип изготавливается на определенную мощность двигателя в нескольких вариантах по размерам (в нескольких „калйбрах“) — на половинные и полные мощность и момент.

Продолжительность пуска, определяемая теми же условиями, сильнейшим образом влияет на подбор физических свойств сопротивления реостата, т. е. его „постоянной времени T “. Как бы ни была велика продолжительность пуска, но теплоотдача не может играть значительной роли в процессе нагревания во время первого пуска, и, следовательно, все внимание должно быть направлено на увеличение тепловоспринимающей способности „С“ и, следовательно, величины T . Это может быть достигнуто без изменения размеров так называемым „наполнением“ реостата („Füllung“), т. е. погружением элементов сопротивления в какое-либо теплоемкое и изолирующее вещество — обычно масло или песок.

Мы будем различать быстрый и медленный пуск. Требование максимально допустимой по „броскам“ тока быстроты пуска, как это имеет место в приводе вспомогательных механизмов прокатных станов, зачастую определяет выбор автоматического управления пусковой аппаратуры (см. § 4), высокая стоимость которой оправдывается быстротой работы, недоступной при ручном управлении. В целях замедления пуска в автоматических реостатах применяются демпфер, ветрянка и тому подобные устройства. При ручном управлении одним из наиболее простых средств может служить амперметр, руководствуясь предписанными показаниями которого рабочий должен производить пуск. При необученном персонале принудительно-замедленный пуск достигается применением замедляющей передачи таким образом, что полный оборот или даже несколько оборотов рукоятки соответствуют, например, переходу щетки только на одну ступень.

Частота пуска h является самым важным фактором*) и определяется исключительно условиями работы. Здесь возможны самые широкие пределы от одного пуска в смену или нескольких десятков в неделю (для мотора, вращающего трансмиссию) до десятков тысяч пусков в неделю, например в специальных горно-заводских кранах или роллгангах. Такой работы не могут выдержать не только обычные реостаты, как ни увеличивать их размеры, но даже и контроллеры без особых контактных приспособлений. Определяя таким образом тип ступенчатого выключателя, этот фактор влияет и на подбор свойств сопротивления:

а) При редком пуске применяется такой род сопротивления или такой монтаж его, при котором реостат может быстро воспринять большое количество электрической энергии в форме тепла, т. е. сопротивление должно обладать большой „постоянной времени“. В продолжительные периоды пауз это тепло постепенно успеет выделиться. Мы видим весьма благоприятные условия для „наполнения“.

б) При частом же пуске приходится позаботиться о хорошей теплоотдаче, чтобы тепло успевало удаляться в короткие паузы.

Кроме частоты пуска в час h , некоторые фирмы в своих каталогах указывают то число включений z , которое реостат может выдержать „под ряд“, если промежутков времени между отдельными пусками равен двояному времени пуска t_b .

Введем обозначения для установленных трех основных факторов:

1) Силу пускового тока мы уже выражали коэффициентом

$x = \frac{I_A}{I_{ном}}$, указывающим, во сколько раз пусковой ток превышает нормальную силу тока.

2) Продолжительность пуска t_b будем выражать в секундах.

3) Частоту h — количеством пусков в 1 час.

О порядке двух величин x и t_b можно судить, составив предварительный подсчет, зная характер привода, главным образом момент инерции и механическую характеристику.**). Ориентировочно их можно принять по таблицам, каталогам и т. п.

1) Относительно величины x в Нормах (§ 22 герм. норм) и в каталогах электротехнических фирм можно найти таблицу (см. табл. 84).

ТАБЛИЦА 84.

Род нагрузки при пуске Тип реостата	Полови- ная	Полная	Тяжелая
Жидкостные и плоские	$x = 0,65$	1,3	1,7
Контроллеры.	$x = 0,76$	1,5	2,0

2) Продолжительность пуска t_b помимо подсчетов (см. главу I) может быть взята по таблицам для конкретных случаев или даже, как первое приближение, по эмпирическим формулам, вроде указываемой в каталогах ВЭО:

$$t_b = 4 + 2\sqrt{P_m} \text{ sec.}$$

*) Величина реостатов определяется не только тем сопротивлением, в котором развивается тепло, но и трудностью выполнения контактов, износ которых пропорционален частоте включения.

**) О подсчетах см. ниже.

3) Частота пуска, выдерживаемая различного рода реостатами, ниже будет дана при описании типов реостатов.

Указанные три величины x , t_b и h вместе с мощностью на клеммах двигателя P_{κ} определяют собою тепло, развиваемое в единицу времени (1 час) в реостате, и, следовательно, его размеры.

Действительно, на 1-й ступени его должна быть поглощена почти вся мощность P_{κ} . Если пуск длится t_b сек., в течение которых ступени реостата постепенно выводятся, то при одном пуске будет поглощено в среднем $\frac{1}{2} x P t_b$ kW-sec, а в 1 час $\frac{1}{2} x P t_b h$ kW-sec $\approx 0,119 x P t_b h$ Cal.

Например, для двигателя в 1000 kW мощностью при каждом пуске продолжительностью $t_b = 60$ sec в реостате будет поглощено около 10700 в. калорий, если $x = 1,5$. Это громадное количество тепла главной частью идет на нагревание реостатов (теплоотдача ничтожна), и вполне понятны затруднения в построении их, особенно для крупных мощностей. Если в двигателе тепловые потери, составляющие около 5% мощности, вызывают такое увеличение размеров, что для сокращения их применяется искусственная вентиляция, то в реостате тепло соответствует в среднем около 50% P , т. е. в 10 раз более. В дальнейшем вернемся к вопросу о мерах к уменьшению габаритов реостатов.

Необходимые для выбора значения t_b и h обычно получают опытным путем. При отсутствии опытного материала остается пользоваться опытом соответствующих фирм, т. е. каталогами, в которых наподобие рядов для кратковременных мощностей двигателей реостаты также разбиваются в ряды для каждой мощности по категориям работы легкой, нормальной и тяжелой и условиям пуска под полной нагрузкой и половинной. Ниже для примера мы приведем такие ряды для крановых реостатов.

До известной степени, в смысле определения порядка величины, можно руководствоваться данными x , t_b и h из таблиц, составленных для наиболее распространенных типов машин, например табл. 85, заимствованной из „Elektromotorische Antriebe“ В. Лемана.

Приведенное далее [см. уравнение (301)] выражение пусковой энергии $\frac{1}{2} x P t_b h$, подсчитанное по нормальным для данного типа реостата значениям x , t_b и h , полученным тем или другим путем, во всяком случае не должно быть превзойдено при работе реостата, иначе он окажется перегретым выше нормы, т. е. тех 250—300°C, на которые рассчитывается материал сопротивления.

Кроме указанных величин, необходимо знать при выборе реостата для асинхронных двигателей еще данные ротора: e — напряжение между кольцами при неподвижном роторе и i — ток при полной нагрузке.

Величина $\frac{e}{i}$ (так называемая „Kennziffer“) введена в каталоги реостатов.

Если ток неизвестен, то вместо $\frac{e}{i}$ можно подсчитать весьма

ТАБЛИЦА 85.

№ по- пор.	Машины-орудия	Пусковой ток $x = \frac{i_A}{i_{ном}}$	Продолжит. пуска t sec	Число пус- ков в 1 час n
1	Печатные станки	1,25—1,75	10—20	1—5
2	Компрессоры (пуск без противо- давления).	0,50—1,25	5—20	1—30
3	Компрессоры (пуск с противо- давлением).	1,5—1,25	5—20	1—30
4	Центробежные насосы $n < 1500$	0,75—1,25	2—15	1—30
5	Центробежные насосы $n > 1500$	1—1,5	5—25	1—30
6	Поршневые насосы (пуск без противо- давления).	0,6—1,25	5—20	1—30
7	Поршневые насосы (пуск с противо- давлением).	1,5—2,0	5—20	1—30
8	Пилы круглые и ленточные	0,7—1,25	3—15	3—30
9	Трансмиссии с малым числом подшип- ников и шкивов	0,75—1,25	5—15	—
10	То же с большим числом	1,25—2,0	10—45	—
11	Вентиляторы	0,6—1,0	2—15	1—30
12	Ножницы, штампы (с махов. кол.)	1,75—2,0	15—60	1—5
13	Центрофуги	1,75—2,0	100—300	1—10

близкое значение $\frac{e^2}{606 \cdot P_m}$, где P_m — мощность двигателя в kW.

(Если при измерении напряжения между тремя кольцами величина e оказывается неодинаковой, а в отношении 1:1:1,4, то ротор — двухфазный.)

Реостаты предлагаются в каталогах обычно для двух, а не трех условий пуска (см. таблицу 84), а именно для пуска под половинной и полной нагрузкой. При особо тяжелых условиях $M_A = 2M_{ном}$ фирмы предлагают брать соответственно большую величину реостата, т. е. для

плоского реостата в $\frac{2}{1,3} = 1,55$ раза, а для контроллера —

в $\frac{2}{1,5} = 1,35$ раза.

Наоборот, величина $\frac{e}{i}$, отыскиваемая по каталогу, во столько же раз уменьшается.

Пример. Асинхронный двигатель 10 kW, имеющий $e = 74V$ и $i = 95A$, должен быть пущен при $M_A = 2M_{ном}$ помощью плоского реостата.

Учитывая $\frac{M_A}{M_{ном}} = 2$, берем реостат на мощность $P = 10 \cdot 1,55 = 15,5$ kW и на $\frac{e}{i} = \frac{74 \cdot 10}{95 \cdot 15,5} = 0,5$, а именно (например по каталогу Сименс-Шуккерт, М. 18с) реостат с воздушным охлаждением на 17,5 kW—

тип К-393. $\frac{x}{0,56}$ или с масляным охлаждением на 25 kW — тип К = $403 \cdot \frac{0}{0,56}$.

В руководящих указаниях по выбору реостатов фирмы обычно, кроме указанных характерных величин $\frac{e}{i}$, P , x , t_b , h и z (теоретического числа пусков под ряд при $t_0 = 2t_b$), вводят еще величины поглощаемой при пуске энергии A . Дадим ниже примеры, пользуясь каталогами крупнейших электротехнических фирм. Фирмы Сименс-Шуккерт и AEG для наиболее ходовых размеров реостатов дают величины t_b , z и h в зависимости от мощности электродвигателя P_m (см. табл. 86 и 88).

ТАБЛИЦА 86.

Данные	Типы		Мощность в kW											
	Постоян- ный ток	Трехфаз- ный ток	3,1	4,4	6,2	8,8	12,5	17,5	25	35	50	70	100	
Реостаты с воздушным охлаждением														
t_b	К-2 004	К-3 001	7	8	9	10	11	12	14	16	18	21	24	
z	К-2 005	К-3 004	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	
h	К- 394	К- 393	8	7	7	6	6	5	5	4	4	3	3	
Реостаты с масляным охлаждением														
t_b	К- 404	К- 403	7	—	9	—	11	—	14	—	18	—	24	
z	К- 424	К- 423	5	—	4	—	3	—	3	—	3	—	3	
h	К- 444	К- 443	4	—	3	—	3	—	2	—	1,5	—	0,6	

На основании приведенных факторов, характеризующих работу сопротивления, фирма вводит постоянные, которыми и пользуется для выбора и расчета на нагрев. Особенно тщательно необходимо проверять реостаты с масляным охлаждением, так как перегрев этих реостатов вызывает кипение масла с последующим воспламенением его.

Установленные фирмой постоянные следующие:

A_1 — энергия, выдерживаемая реостатом при допустимом числе пусков z в kW·min.

A_2 — энергия, которая может быть воспринята реостатом за 1 час в kW·min при частоте h .

A_3 — то же, но при паузах в 15 мин.

A_4 — то же, но при паузах в 4 мин.

D — мощность, выдерживаемая реостатом продолжительно.

Величины A_1 , A_2 , D даются в соответствующих каталогах (см. табл. 87); кроме того дается T_1 — время, необходимое для полного охлаждения.

ТАБЛИЦА 87.

Характеристические данные для выбора реостатов фирмы Сименс-Шуккерт.

Тип реостата	Величина	A_e kW-min	T_e min	A_s kW-min	$A_{s,5}$ kW-min	$A_{s,10}$ kW-min	D kW	Род реостата
K-403	00	7,5 13,6	225 227	4,1 6,5	5,4 8,1	6,1 8,9	0,076 0,115	Плоский
	I	28,5	370	11,0	11,8	14,0	0,130	
	II III	50,0 66,0	445 445	17,0 21,6	19,0 24,3	25,5 26,2	0,26 0,33	
K-404	00	21,0	345	8,4	10,0	10,9	0,14	Плоский
	0	30,0	345	12,1	14,4	15,6	0,2	
	I II	57,0 95,0	410 480	20,4 29,5	23,4 33,5	25,0 35,8	0,32 0,44	
K-423	00	10,5	345	4,2	5,0	5,4	0,07	Плоский
	0	18,0	345	7,5	8,6	9,3	0,12	
	I II	40,0 68,0	410 480	14,3 21,2	16,4 24,0	17,6 25,6	0,22 0,33	
K-424	III	64,0	440	21,4	24,5	26,2	0,33	Плоский
	IV	152	640	37,5	40,0	42,7	0,55	
	V	255	705	58,0	62,0	65,2	0,83	
K-443 } K-444 }	IV	370	910	67,0	71,0	73,0	0,94	Плоский
	V	635	1 000	104	112	116	1,43	
	V	1 000	1 125	146	153	160	2,0	
2 K-443 2 K-444 3 K-443 3 K-444 K-1144	—	1 350	1 280	175	180	190	2,45	Плоский
	I	270	25	270	890	1 300	25	
	II III	500 700	23 16	500 700	1 600 2 500	2 500 4 700	50 100	
K-450, с масляным охлаждением	IV	1 100	17	1 100	3 900	7 200	150	С искусственным охлаждением масла
	V	1 750	20	1 750	5 800	9 900	200	
	VI VII	2 100 3 000	21 22	2 100 3 000	7 100 9 300	12 400 15 200	250 300	
K-405	—	11	220	6,4	8,4	8,9	0,14	С искусственным охлаждением масла
	I	13,6	420	4,6	5,4	5,7	0,13	
	II	18,4	315	8,0	9,6	10,0	0,16	

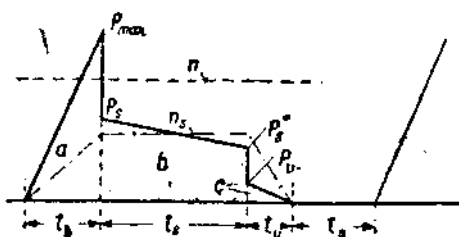
Контроллеры (пластинчатые с масляным охлажде- нием)	Жидкостные реостаты						
		A_e kW-min	T_e min	A_s kW-min	$A_{s_{15}}$ kW-min	$A_{s_{15}}$ kW-min	D kW
К-3300 } К-3301 } К-2300 }	III	82,8	360	13,1	15	16,0	0,25
	IV	95,0	540	26,6	30,0	31,0	0,48
	V	120,0	550	33,3	37,0	39,0	0,59
	VI	190,0	630	46,6	51,5	55,0	0,82
	VII	300	700	68	74,0	77,0	1,17
	0	16,0	300	7,2	8,75	9,0	0,15
	I	26,6	325	11,0	13,2	13,5	0,22
К-473 } К-573 } К-474 }	II	63,0	440	20,8	24,0	24,8	0,39
	III	107	520	31,0	35,0	36,7	0,56
	IV	200	630	49,5	53,3	56,5	0,87
	V	330	780	68,2	72,8	74,3	1,15
	VI	510	915	92,0	100	100	1,5
	VII	830	1050	130,0	134	139	2,1
	VIII	1350	1250	175,0	185	191	2,9
К-612 } К-413 } К-414 }	III	95	135	67,0	106	127	2,1
	III	310	170	200	290	315	3,5
	III V	515	170	335	480	525	5,0
	III	480	280	230	290	315	5,0
	III W	440	50	430	1060	1420	25,0
	III	1400	420	490	560	600	10,0
	III W	1300	70	1200	2460	2900	50,0
К-415 } К-416 }	III	3000	610	780	880	890	15,0
	III W	2800	110	2200	3800	4200	70,0
	III	4400	660	1060	1200	1200	20,0
	III W	4200	130	3200	5000	5700	90,0
	I	750	25	750	2250	3550	65,0
	II	1400	23	1420	4400	6900	130,0
	III	2000	16	2000	7000	13000	260,0
К-450 с искусственным охладителем содового раство- ра	IV	3100	17	3100	10800	19800	390,0
	V	4800	20	4800	16000	27500	590,0
	VI	5800	21	5800	19500	34000	650,0
	VII	8000	22	8000	25500	42000	750,0

Пример. Электродвигатель постоянного тока 220 В мощностью 80 кВт пускается с половинной мощностью (40 кВт). Продолжительность пуска $t_b = 20$ сек. Двигатель пускается сперва три раза под ряд, а затем через каждые 40 минут. Требуется подобрать реостат.

$$A_s = xPt_b z = \frac{80}{2} \cdot \frac{20}{60} \cdot 3 = 40 \text{ kW-min.}$$

$$A_s = xPt_b h = \frac{80}{2} \cdot \frac{20}{60} \cdot \frac{60}{40} = 20 \text{ kW-min.}$$

Этим значениям соответствует тип К-404-II (см. табл. 87), а также К-404-III.



Фиг. 343.

При наличии диаграммы мощности и скорости (фиг. 343) возможно произвести выбор реостата по работе пуска. Если работа совершается с числом оборотов n_s в минуту, которое ниже нормального n , то количество энергии, поглощенное реостатом за время разгона t_b min, будет:

$$A_b = \frac{P_{\max} \cdot t_b}{2} \left(\frac{2n}{n_s} - 1 \right) \text{ kW-min.}$$

Количество энергии за рабочий период:

$$A_s = \frac{(P_s' + P_s'') t_s}{2} \cdot \left(\frac{n}{n_s} \mp 1 \right) \text{ kW-min.}$$

Количество энергии за время замедления:

$$A_c = \frac{P_s \cdot t_s}{2} \left(\frac{2n}{n_s} \mp 1 \right) \text{ kW-min.}$$

(Если площади b или c отрицательны, то в соответствующих выражениях в скобках надлежит брать $+1$ вместо -1 .)

Так как $\frac{P_{\max} t_b}{2} = a$; $\frac{(P_s' + P_s'') t_s}{2} = b$; $\frac{P_s \cdot t_s}{2} = c$, то полное количество энергии, поглощенное реостатом за период работы, будет равно

$$A = a \left(\frac{2n}{n_s} - 1 \right) + b \left(\frac{n}{n_s} \mp 1 \right) + c \left(\frac{2n}{n_s} \mp 1 \right) \text{ kW-min.}$$

Если циклы следуют один за другим, то средняя мощность будет равна:

$$P_{\text{mit}} = \frac{A}{t_n},$$

где t_s — полное время цикла, включая паузу. Если чередуются, как это часто бывает, два цикла, вслед за которыми наступает длительная пауза, то среднее значение:

$$P_{\text{mit}} = \frac{A_1 + A_2}{t_{s1} + t_{s2}}$$

По этому значению легко определить необходимый реостат, пользуясь табл. 87 и принимая $P_{\text{mit}} = D$.

Пример. Подъемный электродвигатель трехфазного тока работает по следующей диаграмме:

$$P_{\text{max}} = 100 \text{ kW}, \quad P_s' = 70 \text{ kW}, \quad P_s'' = 50 \text{ kW}, \quad P_v = 10 \text{ kW}.$$

$$t_b = 10 \text{ sec.}, \quad t_s = 30 \text{ sec.}, \quad t_v = 5 \text{ sec.}, \quad t_r = 30 \text{ sec.}$$

Скорость подъема соответствует 1000 об/мин.

Поглощаемая реостатом энергия за 1 цикл равна:

$$A = \frac{100}{2} \cdot \frac{10}{60} \left(\frac{2 \cdot 1000}{1000} - 1 \right) + \frac{(70 + 50) \cdot 30}{2 \cdot 60} \left(\frac{1000}{1000} - 1 \right) + \frac{10 \cdot 5}{2 \cdot 60} \cdot \left(\frac{2 \cdot 1000}{1000} - 1 \right) = 8,75 \text{ kW-min.}$$

ТАБЛИЦА 88.
Реостаты для трехфазного тока фирмы AEG.

С воздушным охлаждением		С масляным охлаждением		t_b sec.	z		h		Число ступеней k	
Величина	Мощность при пуске с полной нагрузкой kW	Величина	Мощность при пуске с полной нагрузкой kW		Воздушный	Масляный	Воздушный	Масляный	Воздушный	Масляный
I	3,1	00	3,1	8	4	5	8	4	2	2
II	6,2	0	6,2	9	3	4	7	3	4	4
III	6,2	—	—	9	3	—	7	—	6	—
VI	8,8	—	—	10	3	—	6	—	6	—
	12,5	I	12,5	11	3	3	6	3	6	5
	17,5	—	—	12	3	—	5	—	6	—
V	25	II	25	14	3	3	5	2	8	6
	35	—	—	16	2	—	4	—	8	—
VI	50	III	50	18	2	3	4	1,5	10	8
VII	70	—	—	21	2	—	3	—	12	—
VII	100	IV	100	24	2	3	3	0,6	12	10
—	—	V	200	32	—	3	—	0,5	—	16

Средняя мощность:

$$P_{\text{mit}} = \frac{8,75 \cdot 60}{10 + 30 + 5 + 30} = 7 \text{ kW.}$$

Такой работе должен соответствовать реостат k-614-III (см. табл. 87), где $D = 10 \text{ kW}$.

Положив в основу те же факторы, т. е. 1) число пусков z , следующих один за другим при паузах, равных двойному времени пуска, 2) число допустимых пусков в час h и 3) продолжительность пуска t_b , — фирма AEG дает для своих реостатов табл. 88, пользуясь которой можно быстро производить выбор реостата.

Фирма Заксенверк вводит в свои каталоги две величины A и B . Первая (A) представляет собой количество энергии в kW-sec, поглощаемое реостатом при условии нагревания масла не выше 60°C , а вторая (B) — количество энергии, излучаемое реостатом за 1 минуту в kW-sec.

Например, двигатель в 15 kW пускается при полной нагрузке. Пуск совершается два раза в час (через 30 мин.) продолжительностью 35 сек.

Энергия пуска $A = 15 \cdot 35 = 525 \text{ kW-sec}$.

Так как следующий пуск совершается через 30 мин., то за это время реостат должен излучить 525 kW-sec в окружающую среду, т. е.

$$B \cdot 30 = 525 \text{ или } B = \frac{525}{30} = 17,5 \frac{\text{kW-sec}}{\text{min}}.$$

Если обратиться к каталогу Заксенверк (таблиц каталога не приводится), то придется остановиться на типе DOS-0, обладающем постоянными

$$A = 4800 \text{ и } B = 18.$$

Всесоюзное Электротехническое объединение (ВЭО) также дает таблицу, позволяющую по работе пуска $A = P \cdot t_b$, kW-sec, частоте пуска h , числу пусков z и времени пуска в секундах t_b , подобрать необходимый тип реостата с воздушным или масляным охлаждением (см. табл. 89).

Выяснив принципиальную роль факторов x , t_b и z в выборе размеров и конструктивных деталей реостатов, независимо от класса или группы, определяемых характером установки, перейдем к конкретным условиям выбора, остановившись на какой-либо группе реостатов, например для двигателей постоянного тока металлических (нормального числа ступеней) непереворачиваемых и с ручным приводом.

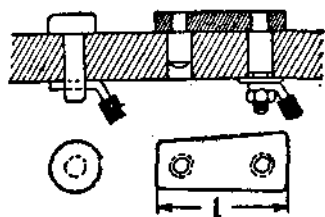
Для этого нам придется рассмотреть те разновидности выполнения контактов, искрогасителей, охлаждения и т. п., которые выработаны практикой для различных заданий x , t_b и z , и следовательно выявить по возможности такие значения этих трех фак-

торов, которые можно принять нормальными для того или другого выполнения.

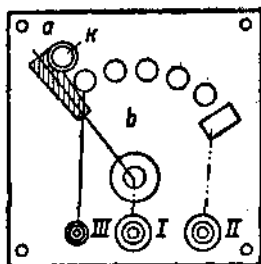
О реостатах других классов и групп будет сказано лишь, поскольку они отличаются в отношении общих оснований выбора, в частности — о жидкостных реостатах, резко выделяющихся как самим материалом, принятым в качестве сопротивления (вода), так и отсутствием контактного ступенчатого выключателя.

§ 2. Плоские металлические реостаты.

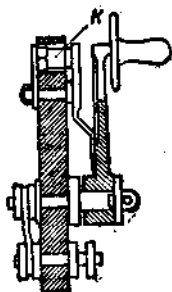
Простейшей формой пускового реостата, применяемой в то же время для наиболее легких условий (наименьших значений t и h), являются плоские металлические реостаты с контактами, расположенными по дуге круга в одной плоскости (Flachbahnanlasser).



Фиг. 344 а.



Фиг. 344 б.



Проволока, служащая сопротивлением, наматывается обычно на фарфоровый цоколь самого реостата или на фарфоровый цилиндр, а чаще подвешивается на роликах за контактной доской. При нормальном воздушном охлаждении эти реостаты массового изготовления рассчитываются на относительно редкие пуски $h=6$ и притом продолжительностью t_b не более 30 сек., т. е. на обычные ходовые условия. Более частого включения не допускает самая конструкция ступенчатого выключения в виду того, что разрушительному действию искрообразования при переходе с одной ступени сопротивления на другую подвергается один и тот же передвижной контакт (щетка).

Остановимся несколько на выполнении щетки и контактов плоских реостатов в зависимости от мощности.

Контакты монтируются на доске из шифера, мрамора, реже из искусственного изоляционного материала.

Шифер удобнее для обработки, но не применяется для напряжения более 250 В. Мрамор — до 600 В и, в исключительных случаях, до 1200 В. Сечение контактов (из красной меди или латуни) берется круглое для малых мощностей и трапециoidalное для больших (фиг. 344 а), причем в целях увеличения поверхности соприкосновения в первое мгновение касания радиальная длина l в контакте берется возможно большей.

При пуске с половинной нагрузкой эти реостаты можно применять для

1	Обозначение типа реостата	с воздушным охлаждением с масляным охлаждением	GL-1,5	GL-2,2	GL-3,1 GO-3,1	GL-4,4 **)	GL-6,2 GO-6,2	GL-8,8 **)
2	Эффективная мощность мотора P_m kW		1,5	2,2	3,1	4,4	6,2	8,8
3	Мощность, потребляемая мотором $P_{эл}$ до kW		2	2,8	4,0	5,7	7,8	10,9
4	Падение напряжения в якорь и подв. провод. в %		17,6	17,6	17,6	14,8	14,8	11,3
5	Средняя пусковая мощность при пуске с $1/1$ и $1/2$ нагрузкой $P_d = 1,3 P_{эл}$ kW		2,6	3,6	5,2	7,4	10,1	14,2
6	Время пуска $t_b \approx 4 + 2 \sqrt{P_m}$ сек.		6	7	7	8	9	10
7	Число пусков	с воздушным охлаждением с масляным охлаждением	4 4	4 4	4 5	3 3	3 4	3 3
8	Частота пусков в час	с воздушным охлаждением с масляным охлаждением	10 10	9 9	8 4	7 3	7 3	6 6
9	Работа пуска $P_{дв}$ kW sec.		15,6	25,2	36,4	60	91	142
10	Наименьшее число пусковых ступеней		4	4	4	6	6	7
11	Наименьшее число предварит. ступеней					1	1	1
12	110 V	Нормальный ток I	18,2	25,5	36,4	52	72	100
		Средний пусковой ток I_{mit} около А.	23,6	33,2	48	68	94	130
		Ток для конечного контакта	36	36	36	72	72	140
	220 V	Нормальный ток I	9,1	12,8	18,2	26	36	50
		Средний пусковой ток I_{mit} около А.	11,8	16,6	24	34	47	65
		Ток для конечного контакта	18	25	36	52	72	100
	440 V	Нормальный ток I	4,6	6,4	9,1	13	18	25
		Средний пусковой ток I_{mit} около А.	6,0	8,3	12,0	17	24	33
		Ток для конечного контакта	10,0	13,0	18,0	26	36	50
	100 V	Ток включения I_1	27,8	39	55,7	80	64	76
		Максим. пусковой ток I_{max} *) около А.	27,8	39	55,7	76,5	106	147
		Миним. пусковой ток I_{min}	20,2	28,3	40,5	59,2	82	114
13	220 V	Ток включения I_1	13,9	19,6	27,8	30	32	38
		Максим. пусковой ток I_{max} *) около А.	13,9	19,6	27,8	38,2	53	73,5
		Миним. пусковой ток I_{min}	10,1	14,2	20,2	29,6	41	57
	440 V	Ток включения I_1	7,05	9,8	13,9	15	16	19
		Максим. пусковой ток I_{max} *) около А.	7,05	9,8	13,9	19,2	26,5	36,8
		Миним. пусковой ток I_{min}	5,1	7,1	10,1	14,8	20,5	28,6
14	$\frac{\text{Максим. пусковой ток}}{\text{Нормальный ток}} = \frac{I_{max}}{I}$ для $1/1$ нагр.		1,53	1,53	1,53	1,47	1,47	1,47
15	$\frac{\text{Миним. пусковой ток}}{\text{Нормальный ток}} = \frac{I_{min}}{I}$ для $1/1$ нагр.		1,11	1,11	1,11	1,14	1,14	1,14
16	$\frac{\text{Максим. пусковой ток}}{\text{Миним. пусковой ток}} = \frac{I_{max}}{I_{min}}$		1,38	1,38	1,38	1,29	1,29	1,28
17	$\frac{\text{Ток включения}}{\text{Нормальный ток}} = \frac{I_1}{I}$		1,53	1,53	1,53	1,15	0,89	0,76

Скопировано с чертежа Х. Э. З. — ТМО 5-Э.

Нормальные реостаты постоянного тока, с воздушным или постоянным охлаждением, с плоскими или цилиндрическими и контактными ходом, для пуска с полной нагрузкой, для напряжений 110, 120 и 440 В.

любой мощности, но при этом необходимо проверить конечные контакты.

GL-12,5	GL-17,5**)	GL-25	GL-35 **)	GL-50	GL-70 **)	GL-100	Примечания.
GO _I -12,5		GO _I -25		GO _I -50		GO _I -100	
12,5	17,5	25	35	50	70	100	
15,1	21,0	29,5	40,7	57	79	111	Для η_{min}
11,3	9,6	9,6	9,04	9,4	7,25	7,25	Принимая электрические потери =
							$\approx \frac{2}{3}$ общих = $\frac{2}{3} (100 - \eta)$
19,6	27,3	38,4	53,0	74,1	103	145	= $1,3 \times P_{kl}$ потреб. мотором мощности
11	12	14	16	18	21	24	= $4' + 2 \sqrt{P_m}$ (P_m в kW)
3	3	3	2	2	2	2	
3		3		3		3	Для максим. температуры перегрева
							масла 80° С. Для песка меньше
6	5	5	4	4	3	3	
8		2		1,5		0,6	
213	328	537	848	1330	2160	3480	Работа ускорения $A = \frac{1}{2} P_A \cdot t_b$
7	8	8	9	9	10	10	
1	2	2	3	3	3	3	
146	190	268	372	516	720	1012	
182	248	350	484	670	940	1320	
140	268	268	516	516	1012	1012	В реостатах для половинной нагрузки обращать внимание на конечный контакт!
70	95	134	186	258	360	506	
91	124	175	242	335	470	660	
140	190	268	372	516	720	1012	
35	48	67	93	129	180	253	
45	62	88	121	168	235	330	
70	96	140	186	258	360	506	
104	128	178	246	340	480	680	
206	277	391	540	750	1040	1460	
180	216	306	428	594	843	1185	
52	64	89	123	170	240	340	
103	138	196	270	374	523	735	
80	108	153	214	297	422	593	
26	32	45	62	85	120	170	
51,5	70	98	135	187	261	367	
40*	54,8	76,5	107	148	210	296	
1,47	1,46	1,46	1,45	1,45	1,45	1,45	
1,14	1,14	1,14	1,15	1,15	1,17	1,17	
1,28	1,28	1,28	1,26	1,26	1,24	1,24	
0,74	0,67	0,67	0,66	0,66	0,67	0,67	



*) Если постоянство I_{max} на всех пусковых ступенях не обязательно, то при сохранении того же числа ступеней, I_{max} может быть превзойден на 20%.

**) Эти реостаты с воздушным охлаждением должны быть заменены ближайшим большим типом.

Таблица 90 дает допустимую нагрузку на контакт в амперах для наиболее ходовых размеров контактов.

ТАБЛИЦА 90.

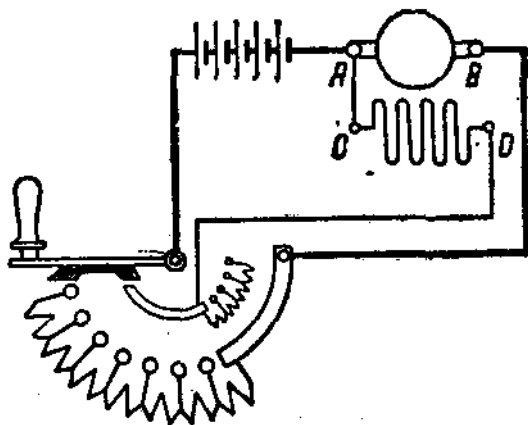
Род нагрузки	Круглый контакт при диаметре в мм			Тrapeзoidalный контакт					
				Длина 25 мм, средняя ширина мм			Длина 35 мм, средняя ширина мм		
	8	10	12	8	12	22	8	12	22
Продолжительная	20	30	45	45	60	90	60	90	120
Прерывистая	35	50	75	75	100	150	100	150	200

Сечение контактных болтов можно проверить по цифрам табл. 91.

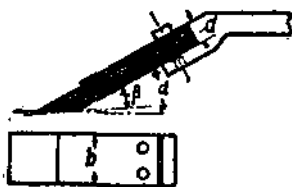
ТАБЛИЦА 91.

Диаметр болта в мм . .	4,5	6	8	10	14	30
Сила тока при продолжительной нагрузке .	25	60	100	200	350	600
Сила тока при прерывистой нагрузке . .	35	85	140	280	500	850

Контактная рукоятка поддерживает контактную щетку из жесткой меди или латуни, имеющую обычную, либо прямоугольную форму (коллекторной щетки) для малых сил тока, либо набранную из отдельных медных листов. Самая рукоятка не делается „токоведущей“, как пред-



Фиг. 345.



Фиг. 346.

ставлено на фиг. 344 б, так как по нормам VDE она должна быть соединена с корпусом реостата и с землей.

Для подвода тока к контактам служит специальное кольцо (или часть его), изображенное на фиг. 345.

Для прямоугольной щетки допускается удельное давление на контакт в $0,5 \text{ kg/cm}^2$ и удельная плотность тока в $0,1 \text{ A на } 1 \text{ mm}^2$. В отношении искрообразования эта форма щетки удобнее наборной из листов, но не применяется для больших мощностей вследствие трудности осуществления достаточно плотного прилегания по всей поверхности.

Наборная листовая щетка устанавливается под углом α к горизонтальной поверхности (фиг. 346).

Рациональнее всего этот угол α принять в 30° при угле заострения щетки $\beta = 25^\circ$, чем достигается плотное прилегание каждого отдельного листа к поверхности неподвижного контакта и равномерный воздушный промежуток между листами.

Более крутая установка нерациональна, так как уменьшает эластичность, и кроме того нижние листы при изнашивании легко могут соскочить с контакта. При угле $\alpha = 30^\circ$ контактная поверхность оказывается вдвое более поперечного сечения щетки.

Удельное давление щетки на контактную поверхность принимается в 3 kg/cm^2 . *)

Удельную плотность тока можно подобрать из табл. 92, считая на контактную поверхность $l, \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ или на поперечное сечение $l_c, \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$.

ТАБЛИЦА 92.

Ширина щетки в mm		10	15	20	25	30	35
Плотность тока на 1 mm^2	контактной поверхности	0,67	0,55	0,50	0,47	0,45	0,37
	поперечного сечения . .	1,34	1,10	1,00	0,94	0,90	0,74

Нагревание щетки не должно превосходить 50° C во избежание уменьшения упругости медных листов.

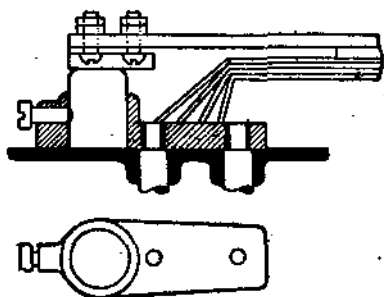
При больших силах тока, в целях уменьшения износа щетки и увеличения числа допустимых включений, предложены были вспомогательные щетки (металлические или угольные).

Контакты, на которых возникают наибольшие искры, снабжаются добавочным угольным контактом (фиг. 344 b); такой же контакт применен на чертеже фиг. 347, причем из первого видно, что этот угольный контакт k еще соединен со щеткой, когда она покидает последний медный контакт.

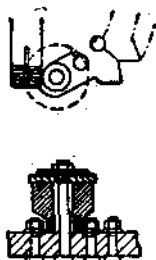
Обгорание, особенно сильное на последнем контакте, может быть уменьшено применением специальной искрогасительной катушки, которая устанавливается за доской (фиг. 348) или даже переносится с контакта на другое место и выполняется по схеме SSW с применением реле (фиг. 349).

*) Полезно проверять это давление, так же как и давление коллекторных щеток, помощью пружинного динамометра.

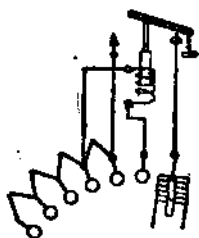
Существует весьма распространенная конструкция центрального искрогасителя, монтируемого на самой рукоятке реостата.



Фиг. 347.

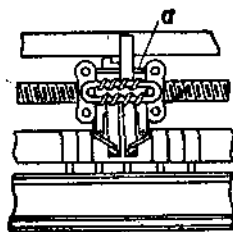


Фиг. 348.

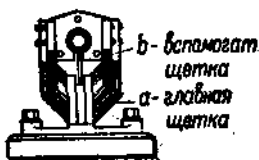


Фиг. 349.

При больших значениях h предпочитают другой тип реостата в отношении контактов — цилиндрический „контроллер“ или еще лучше „контакты“.



Фиг. 350 а.

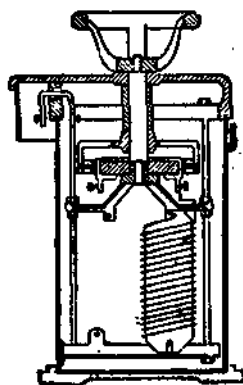


Фиг. 350 б.

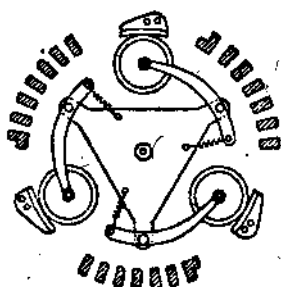
Кроме расположения контактов по дуге круга, применяется при крупных мощностях расположение их в одну линию (по Фиг. 350 а и б); причем щетка, охватывая контакты с двух сторон, передвигается помощью винта

вдоль этой линии наподобие элементного коммутатора аккумуляторной батареи.

В журнале „Siemens Zeitschrift“, 1923, Н. 10, приводится описание



Фиг. 351.



Фиг. 352.

такого реостата для двигателя мощностью 1500 kW с особым искрогасителем. Сопротивления погружены в масло, контакты же находятся на воздухе. В виду того, что работа реостата тяжелая, помимо искусственного охлаждения масла водой, применена внутренняя циркуляция масла помощью особого насосика, чем предупре-

ждается перегрев масла у самых спиралей, от которого уменьшается изолирующее свойство масла.

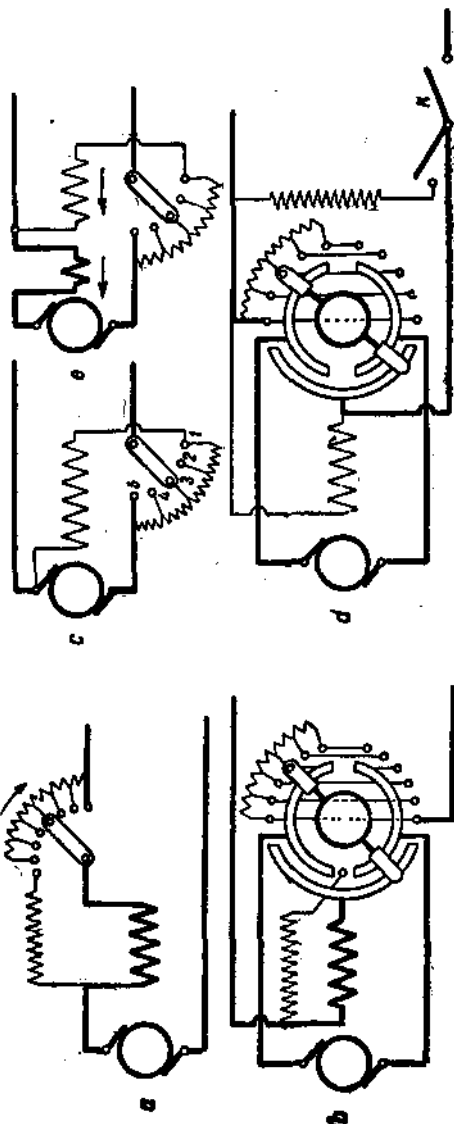
К этому же типу контактного устройства с одной контактной щеткой можно отнести конструкцию, выполняемую заводом АЕГ, барабанного типа (Trommelbahn) по фиг. 351, приспособленную для погружения в масло как сопротивления, так и контактов. Поверхность трения щетки о контакты, расположенные по кругу, здесь оказывается вертикальной, чем и предупреждается осаждение на ней металлических осадков.

Наконец, при больших мощностях в металлических реостатах, вместо скользящего подвижного контакта, применяется иногда роликовый контакт с гораздо меньшим сопротивлением движению. Эту конструкцию, представленную для трехфазного тока на фиг. 352, кроме завода Сименс-Шукерта, принимает завод Броун-Бовери в своем автоматическом регуляторе.

Наибольший ступенчатый реостат с роликовым контактом был выполнен еще в 1901 г. на шахтной установке „Цоллери II“ в Гельзенкирхене для двигателя постоянного тока в 1500 л. с., т. е. при напряжении 500 В для силы тока в 2500 А; диаметр коллектора реостата равен 3 м, а длина отдельных пластин (угольных) равна 45 см.

Передвижение роликов производится сжатым воздухом помощью сервомотора.

Надо заметить, что все плоские металлические реостаты предлагаются в каталогах с оговоркой, что они неприменимы без особых приспособлений для обратного выключения при остановке двигателя. Действительно, при выключении реостата на ходу мотора (например серийного, как представлено на фиг. 353, а) в момент разрыва цепи якоря разрывается и цепь возбуждения, причем электродвижущая сила размыкания (тем большая, чем быстрее происходит выключение) в исключительном случае может вызвать пробивание изоляции обмотки возбуждения; во всяком случае неиз-



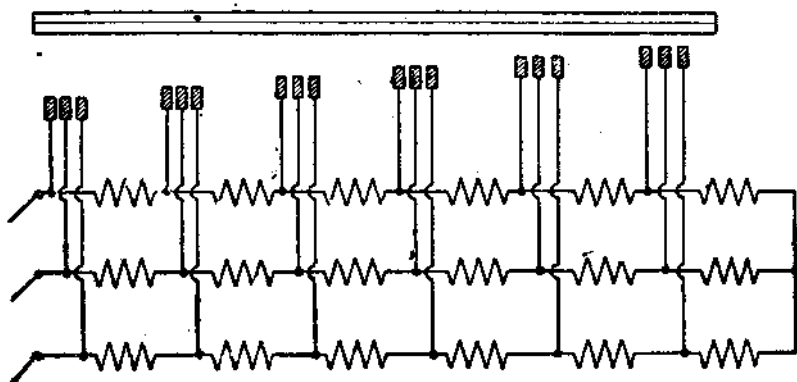
Фиг. 353.

бежным результатом ее является сильное искрение на щетке. Для предупреждения последнего параллельно цепи возбуждения вводится сопротивление, на которое она и замыкается немедленно после размыкания последнего контакта реостата. Расчет этого сопротивления см. Jasse (указан на стр. 159).

При реверсивном реостате в отношении экстраток размыкания целесообразно производить перемену направления тока в обмотке якоря, а не индукторов.

На фиг. 353, *b* представлена такая схема, причем и здесь предусматривается особый контакт с сопротивлением, параллельным обмотке возбуждения.

В схеме шунтового двигателя (фиг. 353, *c*) на первом же контакте реостата обмотка возбуждения получает полное напряжение в целях развития наибольшего начального момента. По мере выведения ручки реостата к якорю подводится все большее напряжение, и магнитное поле вместе с тем уменьшается, что ведет к увеличению числа оборотов. Однако такая регулировка



Фиг. 354.

не может быть сколько-нибудь значительной, так как пусковое сопротивление составляет лишь несколько процентов от сопротивления обмотки возбуждения.

Наконец, в случае размыкания реостата при остановке мотора искрообразование предупреждается тем, что обмотка возбуждения оказывается замкнутой на сопротивление якоря и пускового реостата.

Правда, в реверсивном пусковом реостате такая схема невозможна, по крайней мере с автоматическим подключением сопротивления в обмотку возбуждения. Здесь сопротивление может быть введено лишь помощью особого контакта *K* (фиг. 353, *d*).

Схема пуска нормального компаундного мотора подобна схеме шунтового (фиг. 353, *e*).

При пуске компаундного мотора с противокомпаундным соединением необходимо коротко замкнуть сериесную обмотку поля или даже переменить направление тока в ней, иначе пусковой ток может размагнитить двигатель и ослабить пусковой момент.

Переходной формой контактного выключения к следующей — контроллерной — может быть названа применяемая в автоматических лифтовых реостатах система, изображенная схематически на черт. 354.

Контакты, расположенные лестницей, замыкаются здесь передвижной планкой, естественно, конечно, менее изнашивающейся, чем щетка, так как размыкание каждого контакта происходит на различных частях планки. На фиг. 355 представлен реверсивный реостат такой системы (Lattenkontakte) ручного управления.

Контакты реверсирования установлены изолированно от контактов сопротивления.

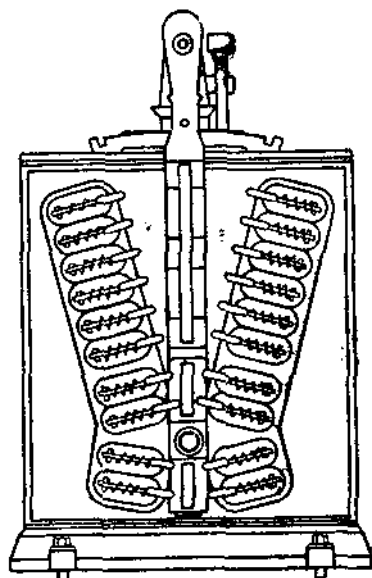
В отношении рода тока ступенчатые выключатели конструктивно не различаются.

Единственным отличием трехфазного тока является лишь число контактов: тройное против постоянного тока для той же плавности, т. е. того же числа ступеней, как это видно из схемы фиг. 356. Для уменьшения его и, следовательно, упрощения и удешевления реостатов существует несколько способов.

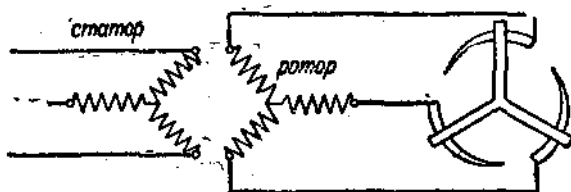
Наряду с устройством двухфазного ротора в трехфазных моторах небольших мощностей пусковой реостат такого двухфазного ротора применяется и для трехфазного по схеме фиг. 357, чем достигается сокращение числа контактов на $\frac{1}{3}$.

Далее общеизвестна пусковая схема Каленберга, представленная на фиг. 358.

Если в нормальной схеме фиг. 356 4 ступени сопротивления дают 5 пусковых положений при 15 контактах во всех трех фазах, то здесь те же 4 ступени сопротивления при 12 контактах дают 13 пусковых положений, что обеспечивает почти тройную плавность пуска.



Фиг. 355.



Фиг. 356.

Общим недостатком изложенных способов уменьшения числа контактов является несимметричная нагрузка фаз ротора и, следовательно, уменьшение пускового момента.

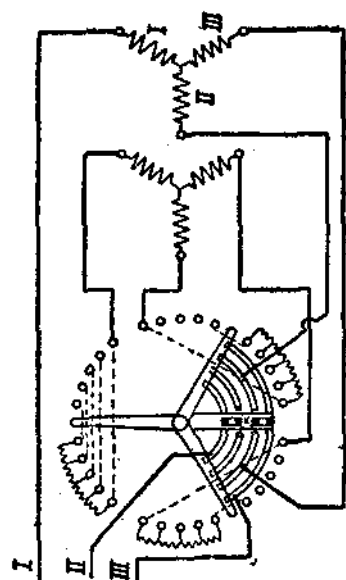
Тройное количество контактов делает особенно затруднительным построение реверсивных реостатов.

На фиг. 359 представлен такой реостат с 30 контактами для тех же четырех ступеней сопротивления и пяти пусковых положений.

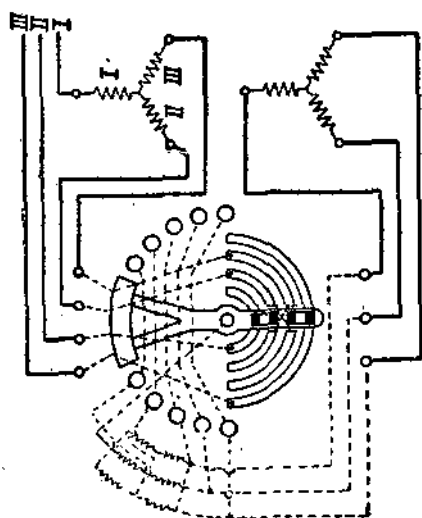
Фиг. 360 изображает реверсивный реостат по схеме Каленберга с 10 контактами для 6 пусковых положений.

Естественно, что применение таких громоздких и дорогих реверсивных реостатов для трехфазного тока может быть оправдываемо лишь исключи-

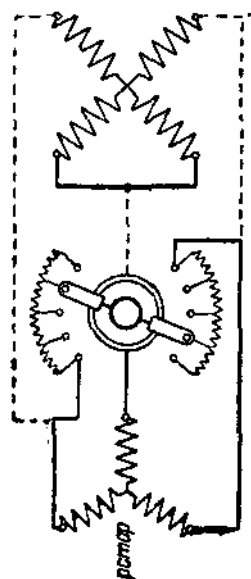
тельными условиями, т. е. достаточно частым реверсированием. В противном случае предпочтительнее применять отдельные переключатель и реостат.



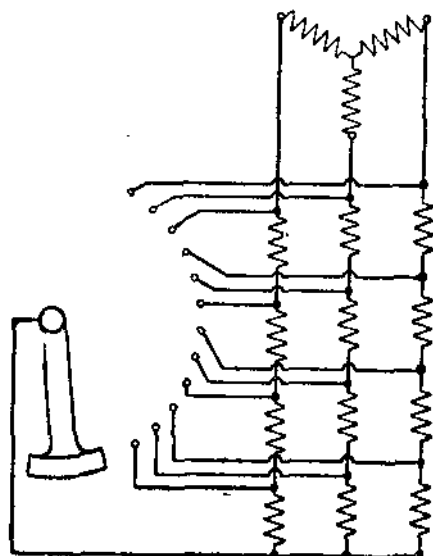
Фиг. 359.



Фиг. 360.



Фиг. 357.



Фиг. 358.

§ 3. Цилиндрические реостаты-контроллеры.

В описанных выше системах металлических реостатов рабочим подвижным контактом является один контакт (в форме щетки или даже ролика), который переходит с одного неподвижного контакта на другой. Как уже сказано, эта конструкция не допускает частого включения вследствие быстрого износа, поэтому для частоты пусков

свыше предельной цифры $h=6-10$ пусков в час приходится обратиться к другой категории реостатов-контроллеров, построенных на другом принципе ступенчатого выключения в форме цилиндра по фиг. 361.

На поворотном барабане располагается один над другим ряд контактов в виде кольцевых сегментов, против которых расположен ряд жестко закрепленных на корпусе реостата упругих контактных пальцев по типу фиг. 362.

При вращении барабана с помощью рукоятки эти пальцы набегают на соответствующие сегменты, и таким образом перерыв тока на каждой ступени реостата происходит на своем отдельном рабочем контакте.

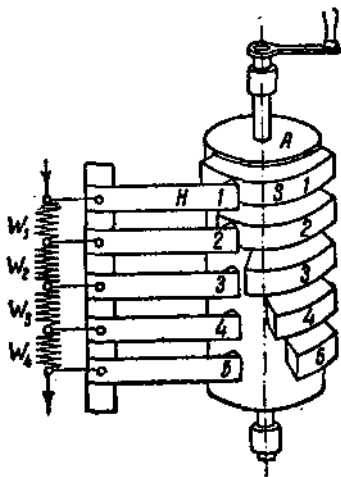
Кроме того при такой цилиндрической конструкции легко осуществляется устройство поворотной искрогасительной катушки, через обмотку которой проходит главный ток. Дуга, образующаяся в месте разрыва тока, раздувается вверх магнитным полем, как указывает фиг. 363.

Результатом такой конструкции является способность контроллеров выдерживать несравненно большее число включений, а именно до 300 включений в час, вместо 6 для плоских реостатов. *)

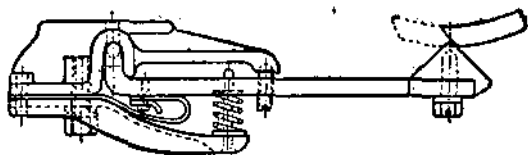
Если число включений меньше, то контроллер может обслуживать большую мощность. В табл. 93 приведены данные допускаемых мощностей в зависимости от частоты включений для контроллеров завода „Динамо“ ВЭО.

Далее, для числа включений h , превышающего указанные цифры, а главное для крупных мощностей применяются контроллеры с угольными контактами (Kohlensteuerschalter).

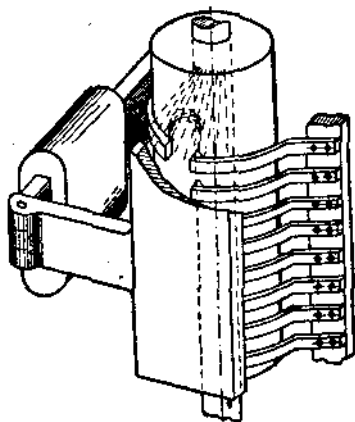
Эти контакты приводятся в движение от особого распределительного валика с кулачковыми дисками, наподобие привода клапанов машин. Контакт осуществляется здесь не скольжением, а нало-



Фиг. 361.



Фиг. 362.

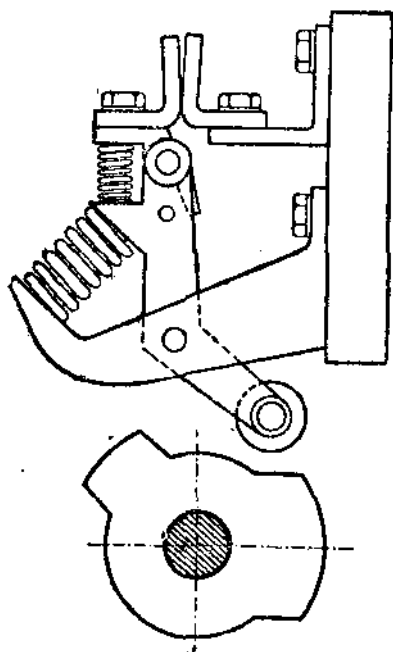


Фиг. 363.

*) Вследствие большей устойчивости дуги постоянного тока ремонт контроллеров по наблюдениям автора оказывается гораздо большим, чем в трехфазном токе.

жением двух плоскостей под давлением (Druckkontakt), как представлено на фиг. 364, следовательно он может быть как угодно массивен и выполнен из особого материала.

Искрогасительная катушка устанавливается на каждом контакте. Такой контроллер выдерживает до 1000 включений в час, а при меньшем числе, начиная с 250, может быть применен для мощности в 125% от нормальной.



Фиг. 364.

Применяется он в одиночных приводах с особо частым пуском, как, например, реверсивные роллганги, а для подъемных устройств — лишь при малом числе двигателей (не более трех), иначе управление им чрезвычайно утомительно, требую значительного усилия. Поэтому для крупных мощностей, когда ручной привод таких реостатов оказывается неудобным, применяется электромагнитное управление работой отдельных выключателей.

Такой электромагнитный выключатель, представленный на фиг. 365, называется в Германии „Schütze“, вероятно по ударному действию, в Америке — „контактором“ и имеет то громадное преимущество перед скользящим пальцем, что в момент включения соприкосновение совершается сразу по всей площади, а не по краю щетки, как в контактах скольжения. *)

Продолжительность службы его в 3—10 раз более при общем выдерживаемом количестве размыканий около 200 000.

ТАБЛИЦА 93.

Режим	Число включений в час	Максимальная мощность в % от нормальной
Нормальная работа	до 30 „ 130	120 110
Пуско-регулируемая работа . .	до 120 „ 240	100 80

Привод электромагнитных выключателей производится незначительным по силе током (не более 1 А), и, следовательно, контроллер, управляющий их действием, оказывается чрезвычайно малого раз-

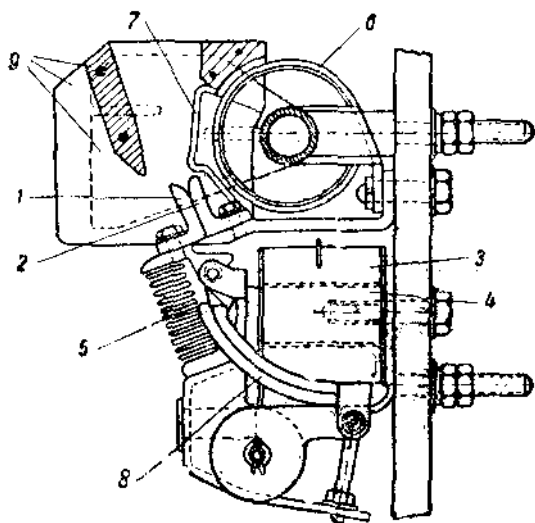
*) В противоположность обычным контроллерам работа „контакторов“ надежнее при постоянном токе, чем на трехфазном.

мера. Поэтому очень легко в одном небольшом центральном контроллере соединить управление несколькими двигателями. Такое оборудование находит применение в многомоторных кранах с частым включением, как, например, горнозаводских кранах — Stripperkrane, Tiefofenkrane и т. д.

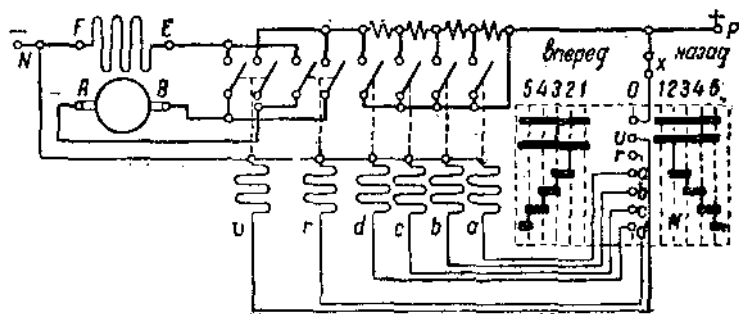
На фиг. 366 представлена схема управления сериес-мотором постоянного тока с помощью Schütze, из которых два (v и r) обслуживают реверсирование двигателя, а четыре (a, b, c, d) замыкают 4 секции сопротивлений.

Наконец, при трехфазном токе применяется еще промежуточный тип: обычный контроллер с электромагнитным управлением одного реверсирования (Drehstromkontrollor mit Statorschützen).

Не входя здесь в разбор многообразных электрических схем управления кранами, которые исключительно обслуживаются контроллерами, причем число контактов весьма возрастает с применением электродинамического торможения (одна такая схема была дана выше, в главе III), отметим только, что завод AEG для руководства при выборе размера реостата предлагает следующую таблицу (см. табл. 94 на стр. 184), где работа разбивается на 4 группы:



Фиг. 365.



Фиг. 366.

1. Легкая работа ($h=10-30$ в 1 час) малых подъемников, кранов в машинных помещениях.

2. Нормальная работа ($h=40-120$ включений в 1 час) для безударного пуска моторов, но без всякой регулировки их скорости

ТАБЛИЦА 94.

Тип контроллера	Мощность в % от нормаль- ной	Число вклю- чений в час	Род работы	Примеры применения в области подъемных устройств
Обычный контрол- лер (с пружинными медными контакт- ными пальцами)	125	$n = 10 - 30$	Легкая работа	Подъемники малой мощ- ности
				Краны в машинном поме- щении
Контроллер с уголь- ными контактами (Steuerschalter)	100	$n = 40 - 120$	Нормальная работа	Краны в заводских мастерских
				Передвижение литейных кранов (Fahrwerke)
				Краны на верфях
				Поворотные краны
				Загрузочные машины
				Краны в прокатных мастерских
	90	200	Пуск с ре- гулировкой скорости	Подъем литейных кранов (Hubwerke)
	80	240	Тяжелая работа	Краны с лапами (Pratz- kane)
	65	360		Краны для переноски блванок (Blockkane)
	125 100	240 600	Тяжелая работа	Краны металлургических заводов не более чем с тремя моторами
Электромагнитное управление (Schütz- zensteue- rung)	125 100	240 600	Все 4 рода работы	При больших мощностях
				Штриппер-краны
Обычный контрол- лер с электромаг- нитным управлением реверсирования тока	125 100 75	120 300 600	Все 4 рода работы	При больших мощностях рейферные краны и металлургические
				Краны в металлургиче- ских заводах
				Штриппер-краны

(2—3 контакта), работа кранов в заводских мастерских, эллинговые краны, портовые для штучных грузов, „вагон-кипперы“ и т. д.

3. Работа управления пуском и регулировкой ско-
рости. Для мягкого трогания с места и тонкой регулировки ско-

рости контроллеры получают не менее 5 контактов; применяются в литейных кранах, монтажных, заклепочных и т. п.

4. Тяжелая работа — для особо частых включений без регулировки скорости, но с быстрым движением больших масс (большие ускорения), как, например, работа штриппер-кранов, кранов с грейферами (для массовых грузов — уголь, песок, зерно и т. д.), роллангов и т. п. Управление либо ручное, но непременно с угольными контактами выключателя, либо электромагнитное (Schützensteuerung).

Как было указано выше, при выборе типа контроллера для кранов, кроме частоты пуска, надо руководствоваться и мощностью кранового двигателя. Наиболее дешевый тип со скользящими контактами допускается для частоты не свыше 120 включений в час и мощности не свыше 40 kW (для металлургических кранов еще ниже). Для более тяжелой работы и для мощности свыше 40 kW обычно применяются кулачковые контроллеры или с контакторами.

§ 4. Автоматическое управление пуском.

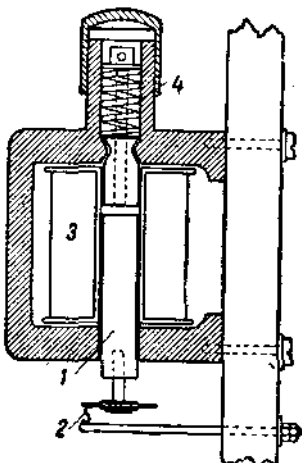
До сих пор говорилось о ручном управлении пуском и регулировкой.

За последнее время механизация и автоматизация управления стали одним из центральных вопросов электрификации механизмов, в результате чего появилось большое количество конструкций электрической аппаратуры.

Обращаясь к пусковой автоматической аппаратуре, надо признать, что достигаемое современными контакторными устройствами количество включений или реверсов (например в приводе роллангов) было бы невозможно получить ручным путем, так как только автоматическая работа контакторов (одной секции сопротивления за другой) позволяет при тщательной регулировке реле добиться минимально допустимого времени между включением отдельных секций. Именно этими „производственными“ выгодами укорочения времени маневров и можно объяснить распространение дорого стоящей пусковой аппаратуры, которую по типу американской начал выполнять и Харьковский завод ВЭО.

В основу действия современных контакторных автоматических систем кладется один из следующих четырех принципов: 1) действие в зависимости от силы рабочего тока, 2) ограничение времени ускорения, 3) комбинирование ограничения времени и тока и 4) действие в зависимости от напряжения на якоре двигателя.

1) В первой системе последовательное замыкание реле отдельных контактов регулируется силой проходящего в главной цепи тока. Для небольших мощностей применяются так называемые „сериес-

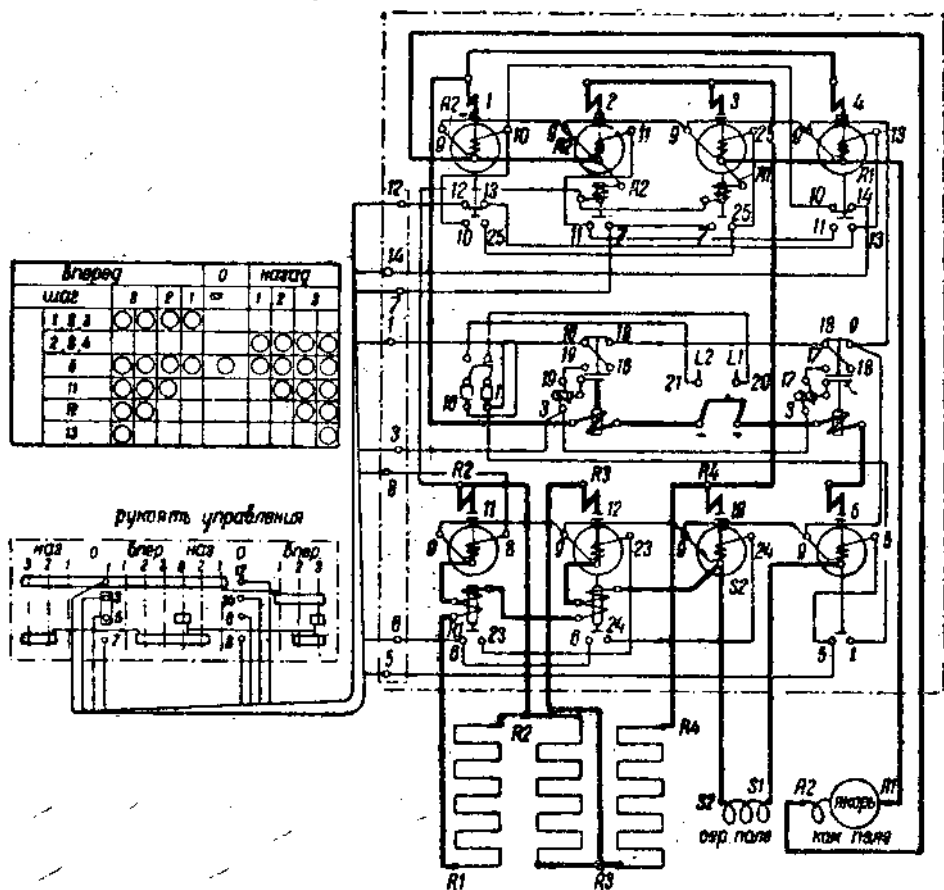


Фиг. 367.

контакты", по обмотке которых идет главный ток и которые не требуют никаких дополнительных реле.

Для более крупных мощностей применяются „шунтовые контакторы", которые работают в зависимости от положения „дополнительного" реле (фиг. 367).

При нижнем положении его подвижного сердечника 1 контакты 2 цепи реле контактора замкнуты, после чего последний начинает работать.



В катушке 3 реле ограничения тока заложены две обмотки — шунтовая и последовательная, действие которых взаимно парализуется при некоторой силе тока, на которую отрегулировано реле. При пуске электродвигателя начальный толчок пускового тока заставляет втянуться сердечник 1. После того как сила пускового тока упала до некоторой величины, на которую отрегулировано реле, действие обмоток взаимно уничтожается, и подвижной сердечник упадет под влиянием веса и пружины 4. После замыкания контактов 2 начинается работа контактора.

Схема подобного реверсивного контактора изображена на фиг. 368.

Контакторные контроллеры типа МТ

kW	Тип		Размеры в мм (по фиг. 371,а)		Контакторы			Ток
	К серийному двигат. МТ-А	К комплектному двигат. МТ-Б	А	В	110 V	230 V	500 V	А
22,0	МТ 2-А	МТ 2-Б	715	1 210	КПД 2113	КПД 2213	КПД 3513	120
40	МТ 3-А	МТ 3-Б	715	1 210	КПД 3113	КПД 3213	КПД 3513	210
80	МТ 4-А	МТ 4-Б	815	1 350	КПД 4113	КПД 4213	КПД 4513	415
150	МТ 5-А	МТ 5-Б	965	1 410	КПД 5113	КПД 5213	КПД 5513	750

где А — размер панели по горизонтали, а В — по вертикали

Командо-контроллер (фиг. 371, б)

Для одного положения ВП 1

Для трех положений ВП 2

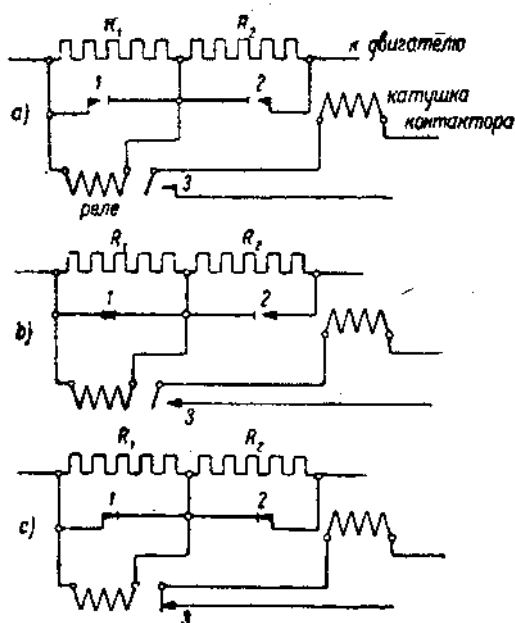
Габаритные размеры по ТМО 2099-3

Ящики У12 (фиг. 371,с)

kW	Количество ящиков	kW	Количество ящиков	kW	Количество ящиков
7,5	1	30	3		
11	2	40	3		
15	2	50	3		
22	2	56	4		

Данные ящиков У 12 по ТМО 2098

2) Гораздо большее распространение получила система, построенная на принципе ограничения времени ускорения. Выдержка времени между включениями отдельных контакторов достигается при помощи специального реле, основанного на следующем принципе: при включении первого контактора, шунтирующего последнюю степень пускового реостата, катушка реле замыкается „накоротко“; но вследствие значительной самоиндукции последний поток в сердечнике реле исчезнет не сразу. Только по истечении некоторого времени, при определенном значении потока, регулируемом пружиной, якорек реле отлипает и замыкает катушку следующего контактора. Никаких других приспособлений для выдержки времени, кроме указанного действия самоиндукции, в этом реле нет.



Фиг. 369.

Принципиальная схема работы изображена на фиг. 369, а, б, с. Вначале (схема а) ток проходит по сопротивлениям R_1 и R_2 к электродвигателю. Падение напряжения в ветви R_1 достаточно для притягивания якоря реле и для получения разрыва цепи катушки контактора. Когда включится контактор 1 (схема б), то катушка реле окажется замкнутой „накоротко“; однако, как уже было сказано, реле своих контактов сразу не замкнет, и лишь по прошествии некоторого промежутка времени контакт 3 реле окажется замкнутым и придет в действие контактор 2 (схема с).

Указанный тип контактора нашел себе огромное распространение в Америке. В СССР изготавливается Харьковским электромеханическим заводом ВЭО. В таблице 95а приведены

основные данные контакторных панелей типа МТ и контроллеров управления Харьковского завода, а в таблице 95б — таких же панелей американской фирмы General Electric С-пу (G. E. C.).

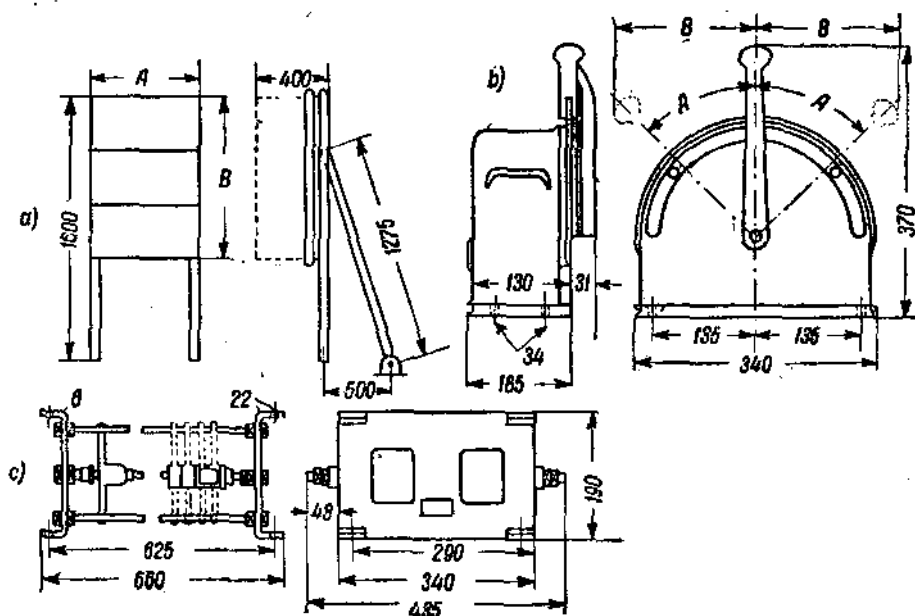
Итак автоматическое пусковое управление состоит из: 1) панели, содержащей контакторы и реле, управляющие контакторами (фиг. 371,а), 2) сопротивлений (фиг. 371,с) и 3) поста управления („командо“) (фиг. 371,б).

Аппаратура трехфазного тока дороже приблизительно на 50% и сложнее. Например, контактор состоит из 60 частей против 25 частей на постоянном токе.

В Германии избегают устройства панелей, считая, что удары при включении разрушают материал панелей (мрамор, шифер) и монтируют контакторы на железе, что дороже и сложнее в установке.

ТАБЛИЦА 95б.
Американские контакторные панели CR-426I.

П а н е л ь							Сопротивление (фиг. 371,с)			Стои- мость контак- торной панели в дол- ларах
Мощность НР (60 мин. при повыше- нии темпе- ратуры, на 75° С)	Вес в англ. фун- тах	Размеры в дюймах (фиг. 371,а)		Шунт. контакты 4 реверс., 1 тор- мозной			№	Вес фун- тов	Число ящи- ков	
		А	В	№	60 мин.	Число уско- рений				
11— 15	300	24	42	1115	120	2	1 928 600	110	1	396
16— 20	300	24	42	1115			— 602		2	418
21— 30	800	24	42	1115			— 603		2	418
31— 40	385	28	44	1117			— 604		2	465
41— 50	385	28	44	1117	210	2	— 605	2		
51— 55	385	28	44	1117			— 608	2		
56— 60	550	32	48	1119			— 608	2		
61— 70	550	32	48	1119	415	2	— 606	330	3	561
71— 80	550	32	48	1119			— 607		4	583
81—100	550	32	48	1119			— 609		3	605
101—110	550	32	48	1119			— 610		5	583
111—135	900	36	54	1121	750	2	2 842 476	550	5	627
136—150	900	36	54	1121			— 477		6	913
								660	6	935



Фиг. 371.

нитных полей при прохождении тока подсакивает, причем пластинка G, прикрепленная к ее верхней части и лежащая на контактах H, разрывает при этом контакты.

Время разрыва зависит от продолжительности нахождения трубки в воздухе, т. е. от толчка тока и от силы магнитного тока катушки A, задерживающего падение трубки.

Сравнивая отдельные системы контакторов между собой, необходимо отметить следующее: система, работающая в зависимости от изменения силы рабочего тока, действует удовлетворительно, если двигатель несет всегда одну и ту же нагрузку. В случае увеличения момента сопротивления меняются также и пусковые условия. Сила пускового тока возрастает, и отрегулированное на меньшую нагрузку реле не будет действовать. Чтобы избежать этого, необходимо производить регулировку реле на максимальный встречающийся момент сопротивления, считаясь при этом с ускоренным пуском на небольших нагрузках. Отсюда следует, что контактор, работающий с ограничением силы тока, будет уместен в приводах, обладающих большой массой, так как при наличии ее пуск будет происходить примерно в одинаковых условиях при различных полезных нагрузках (шаровые мельницы, прокатные станы с маховиками, краны).

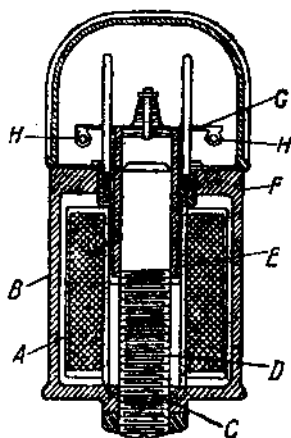
Контакторы с ограничением времени ускорения свободны от вышеописанного недостатка. Здесь разгон двигателя происходит практически одинаково быстро при всех нагрузках. Реле не требует особой регулировки. Однако это обстоятельство должно быть оценено как недостаток, так как сильно нагруженный двигатель должен, как правило, разогнаться более продолжительное время, нежели слабо нагруженный, чтобы его пусковой ток не достигал чрезмерно большой величины. Таким образом и эта система контакторов не может удовлетворить всем требованиям практики.

Третья (комбинированная) система свободна от недостатков первых двух.

Для сравнения двух последних систем были сняты осциллограммы с электродвигателей, пуск которых совершался при помощи контакторной системы с различными нагрузками на валу. В то время как система с ограничением времени при пусках с нагрузкой в 50%, 100% и 200% от нормальной дала почти одно и то же время разгона, система с комбинированным реле позволила произвести пуск электродвигателя при 25% нагрузки в 2,5 сек, при 50% — в 3,1 сек, при 100% в 3,8 сек и при 150% в 4,3 сек.

4) Последняя система, действие которой основано на изменении якорного напряжения при пуске, заключается в следующем (фиг. 373):

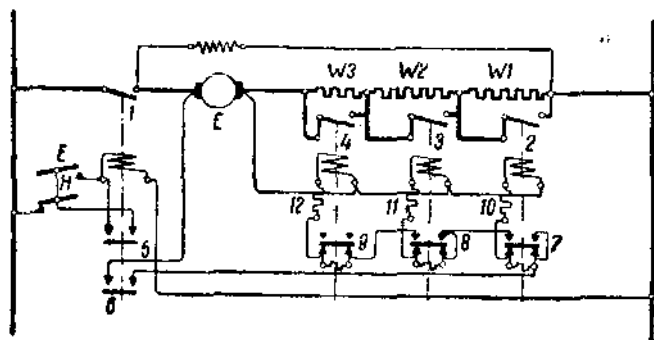
После включения главного реле 1 кнопкой *Е* замыкается контакт 6, подключающий реле 2 к якорю. В тот момент, когда напряжение на якоре достигает некоторой величины V_1 , реле 2 приходит в действие, шунтируя первую секцию пускового сопротивления и замыкая одновременно контакты 7, при помощи которых включается реле 3. Последнее отрегулировано на более высокое напряжение V_2 , чем реле 2, и приходит в действие в тот момент, когда на якоре будет иметь место это напряжение. Вслед за реле 3 включается реле 4.



Фиг. 372.

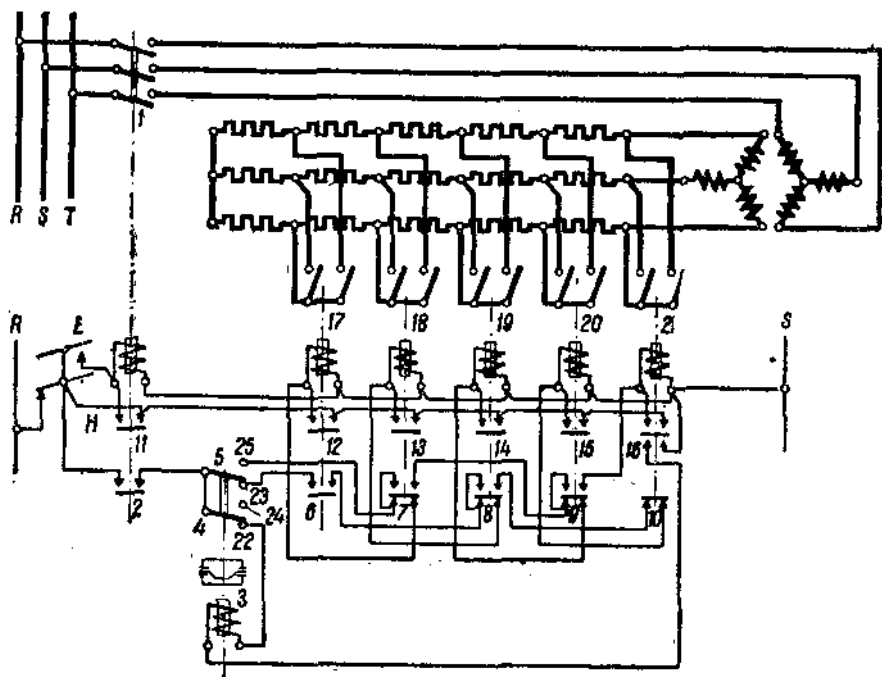
Регулировка отдельных реле на различные напряжения достигается подбором добавочных сопротивлений 10, 11 и 12.

Система показала себя чрезвычайно удобной и начинает получать широкое применение в Германии (см. „AEG-Mitteilungen“, 1930, Н. 12)



Фиг. 373.

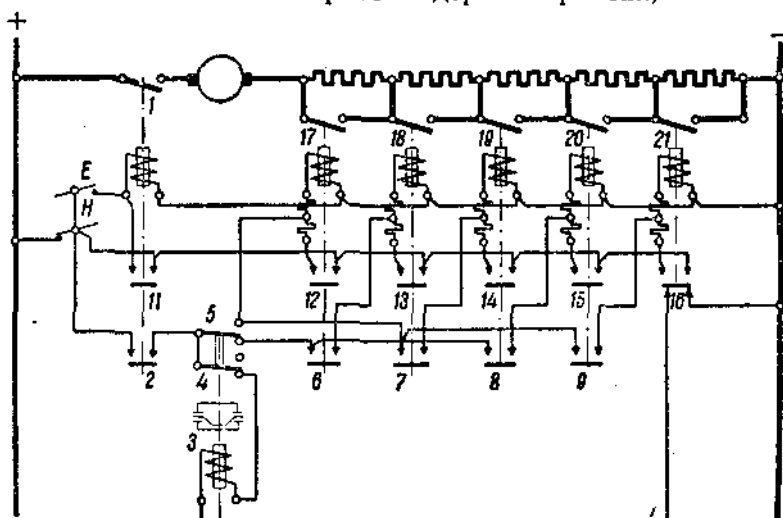
Аналогичная система может быть применена и для трехфазного асинхронного двигателя. В этом случае реле включаются параллельно ротору. Действие последней системы обратно действию



Фиг. 374а.

только что описанной, так как с увеличением числа оборотов ротора напряжение на его кольцах падает, и реле должны замыкать соответствующие контакты, не втягивая, а выбрасывая сердечники.

4 и 5 — главные контакты реле выдержки времени,

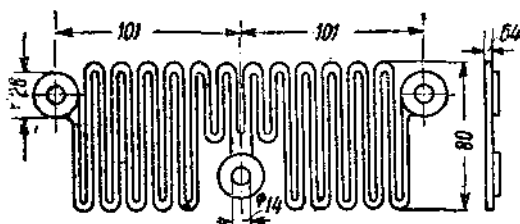


Об аппаратуре для кнопочного управления станками будет сказано далее — в конце этой главы.

§ 5. Выбор сопротивления и его монтажа. Наполнение реостатов („Füllung“). Пусковая работа.

Из сказанного выше о типах контактного ступенчатого выключения можно видеть, насколько металлические реостаты различаются в отношении допускаемого числа включений и, следовательно, насколько разнообразен выбор их.

Что касается сопротивлений, то вопрос о выборе их может возникнуть лишь в том случае, если они монтированы не на самом реостате (на его фарфоровом цоколе или на обратной стороне контактной доски в виде проволочных спиралей из реостата и т. п.), а в особых ящиках, как то имеет место, например, при крановых контроллерах.



Фиг. 375а.

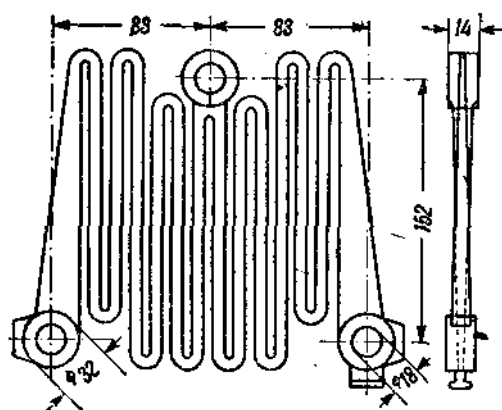
Здесь в виду крайнего разнообразия крановой работы может встретиться необходимость в подборе сопротивления из отдельных элементов его.

Эти элементы отливаются на заводах нескольких типов по форме (три примера представлены на фиг. 375 а, б, с) в зависимости от сопротивления и притом обычно из нескольких материалов (чаще чугуна и ферромарганца с вдвое большим удельным сопротивлением).

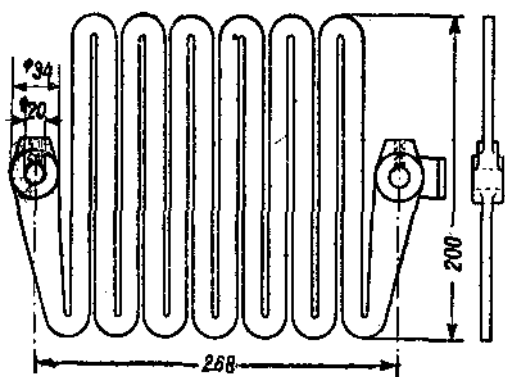
В табл. 96 приведены для примера значения сопротивлений элементов в омах и прочие данные, необходимые для подбора количества элементов последовательно или параллельно.

Допустим, что требуется составить сопротивление для контроллера кранового трехфазного двигателя мощностью 22 kW при 210 V и 65 A роторного тока, общим сопротивлением в 1,90 Ω в каждой фазе и с пятью ступенями в 0,95; 0,50; 0,25; 0,13 и 0,07 Ω .

Группируя результаты подбора в табл. 97, имеем 39 элементов трех типов В', С и С' на одну фазу, а всего 117 элементов, которые надлежит разместить в трех ящиках, подвесив на стержнях с изолированными прокладками, согласно фиг. 377.



Фиг. 375б.

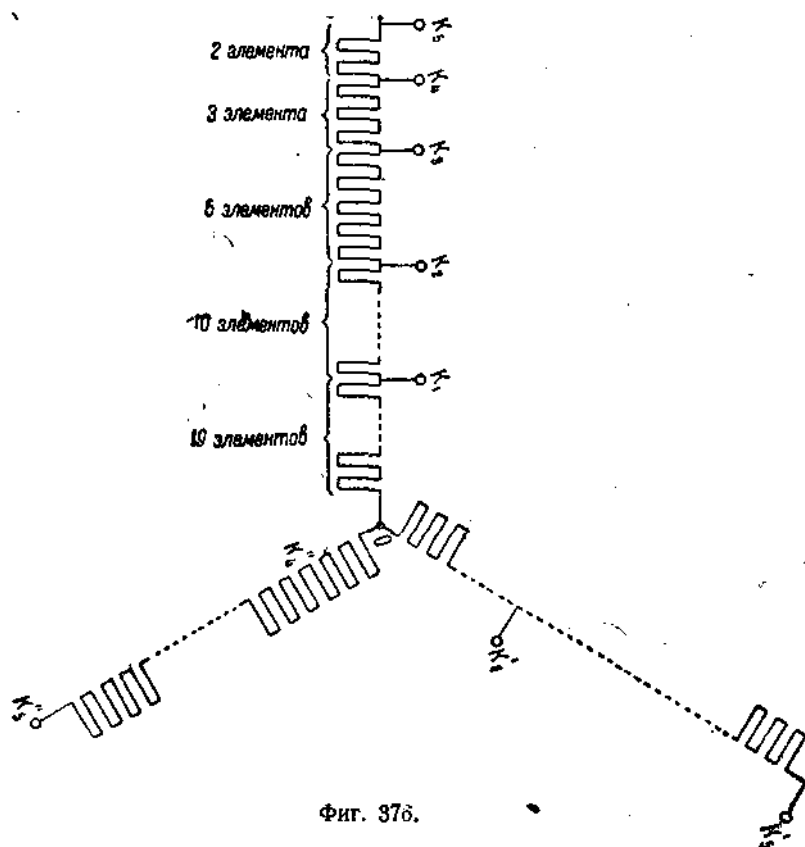


Фиг. 375с.

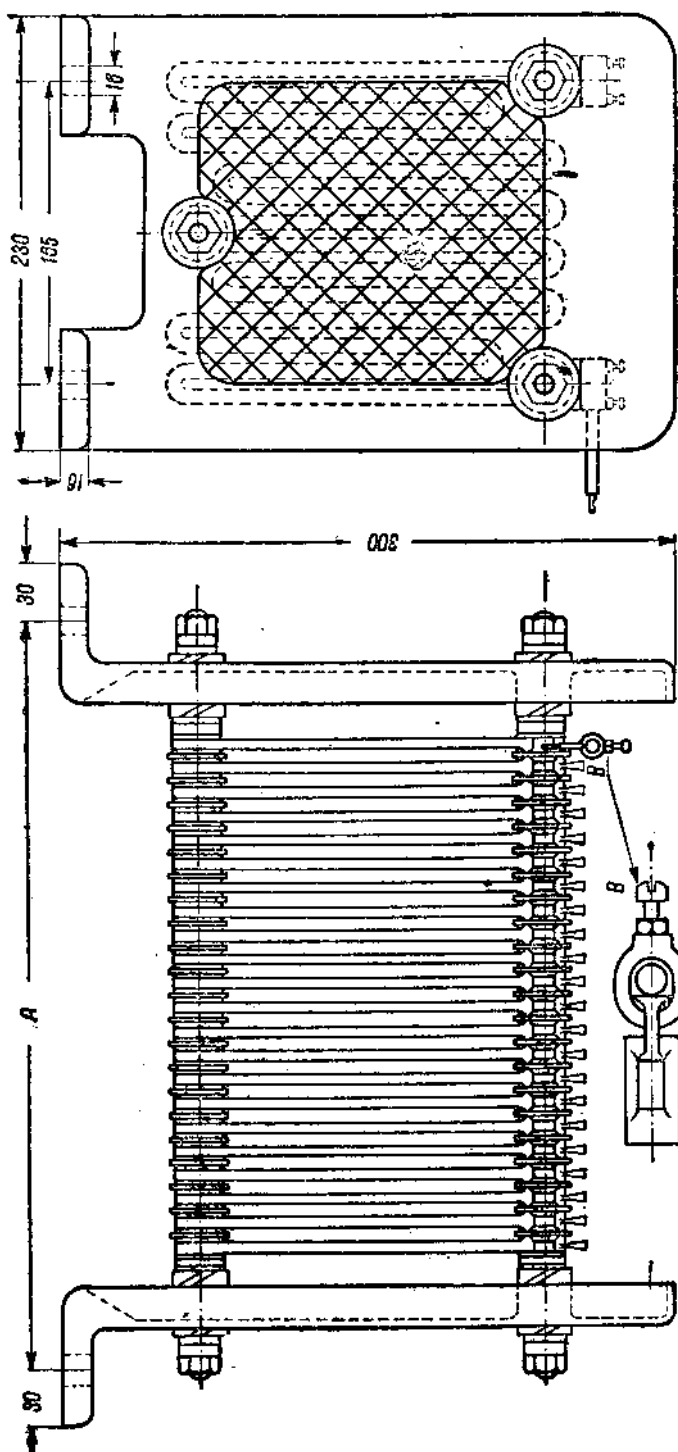
Ящики сопротивлений из реостановых проволочных спиралей или литых чугунных и ферромарганцевых помещаются иногда

ТАБЛИЦА 96.
Таблица допускаемой нагрузки элементов.

Тип	Материал	Сопротивление в Ω	Переменная нагрузка при нагреве 200° С в амперах для t min							Постоянная нагрузка в А	
			Ватт секунд	$\frac{1}{2}$ min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	При нагре- ве на 100°	При нагре- ве на 200°
A	Ф.-марг. .	0,26	13 000	42	30	21	17	15	13	8,5	10
A'	Чугун . .	0,13	20 000	73	52	36	30	26	23	12	20
B	Ф.-марг. .	0,1	94 000	177	126	89	73	63	56	24	35
B'	Чугун . .	0,05	124 000	288	200	143	117	104	21	35	48
C	Чугун . .	0,03	325 000	610	420	300	244	214	190	64	90
C'	Чугун . .	0,02	362 000	780	550	390	320	276	246	80	110



Фиг. 376.



Фиг. 377.

ТАБЛИЦА 97.

Контакты по схеме фиг. 376	Сопротивление между 2 контактами	Сопротивл. между конт. секц.	Сумма сопротивл.	Тип элемента	Число элементов параллельно	Число элементов последовательно	Общее число элементов
$0 - k_1 \dots$	0,05	0,95	0,95	B'	—	19	19
$k_1 - k_2 \dots$	0,05	0,50	1,45	B'	—	10	10
$k_2 - k_3 \dots$	0,05	0,25	1,70	B'	—	5	5
$k_3 - k_4 \dots \left\{ \right.$	$\begin{matrix} 0,05 \\ 0,03 \end{matrix}$	0,13	1,83	$\begin{matrix} B' \\ C \end{matrix}$	$\begin{matrix} - \\ - \end{matrix}$	$\begin{matrix} 2 \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 2 \\ 1 \end{matrix}$
$k_4 - k_5 \dots \left\{ \right.$	$\begin{matrix} 0,05 \\ 0,02 \end{matrix}$	0,07	1,90	$\begin{matrix} B' \\ C' \end{matrix}$	$\begin{matrix} - \\ - \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix}$
					Всего на 1 фазу 39 элементов		

в значительном расстоянии от контроллеров за недостатком места в кабине крановожатого, что, конечно, имеет свой недостаток в виду большого числа соединительных проводов.

Надо однако сказать, что и такую простую работу подбора приходится делать лишь в исключительных случаях, так как новейшими каталогами реостатов и сопротивлений предусматриваются всевозможные виды крановой работы. Так, подобно моторам и контроллерам, сопротивления для каждой мощности предлагаются (см. каталог AEG, 1920) в четырех видоизменениях (рядах) для одной и той же мощности мотора, в зависимости от его работы, а именно:

I ряд — для нормальной работы, например для кранов в заводских мастерских, однако для скоростей не более 60 m/min; при скорости 70—100 m/min — уже II ряд; при скорости выше 100 m/min — III ряд.

II и II^a ряд — для регулировочной работы, с большим сечением и большим сопротивлением, например для литейных кранов.

Оба ряда имеют одно сечение, но ряд II (для переменной нагрузки) имеет большее сопротивление, чем ряд II^a (для постоянной нагрузки).

Таким образом ряд II применяется для подъема, ряд II^a — для передвижения моста (где нагрузка почти постоянна, так как почти не зависит от величины полезного груза). III ряд — для тяжелой работы (с полной нагрузкой) имеет большее сечение, чем ряд II, но меньшее сопротивление, так как при тяжелой работе (на сталелитейных заводах, в роллгангах и т. п.) не требуется регулировка, но зато большое ускорение масс.

Следовательно, большую часть двигатель работает на пусковом токе (x -кратном от нормального).

Приведем здесь табл. 98, которую завод AEG дает для выбора рода сопротивления.

ТАБЛИЦА 98.

Род работы	Ряд	Область применения
Нормальная работа с переменной и полной нагрузкой . . .	I	Подъем и передвижение в обычных заводских кранах при скорости до 70 m/min (при скорости 60—100 m/min — ряд IIa). При скорости более 100 m/min — ряд III.
Работа с регулировкой скорости при переменной нагрузке	II	Подъем в литейных кранах, порталных, для штучного товара и в эллинговых.
Та же работа с постоянной полной нагрузкой и тяжелая работа с переменной нагрузкой	IIa	Передвижение тележки и моста в литейных и эллинговых кранах. Поворот вращающихся кранов. Загрузочные машины. Подъем на небольшую высоту в грейферных кранах.
Тяжелая работа с полной нагрузкой	III	Подъем и передвижение тележек и мостов углеперегрузочных кранов (при больших скоростях), тяжелых горнозаводских и портовых кранов.

Несравненно более инициативы требуется со стороны проектирующего электромоторный привод при выборе охлаждения элементов сопротивления. Как уже сказано, последние могут быть установлены на воздухе (воздушное охлаждение) или погружены в какое-либо более теплоемкое изолирующее вещество — масло или песок.

Благодаря такому „наполнению“ реостата значительно увеличивается его „постоянная времени“ $T = \frac{C}{A}$, а вместе с тем изменяются и его физические свойства.

Пусковая работа („Anlassarbeit“):

$$\frac{1}{2} x P_{kl} t h \text{ kW-sec} = 0,119 x P_{kl} t h \text{ cal.}, \quad (301)$$

которую может выдержать реостат с наполнением при тех же размерах, становится значительно больше, т. е. может быть увеличена либо пусковая мощность xP , либо продолжительность пуска t_p . По исследованиям Natalis'a нагрузочная способность повышается при масляном наполнении приблизительно в 10—20 раз.

Наоборот, при одной и той же мощности могут быть соответственно уменьшены размеры реостата. Естественно, что наполнение имеет особенное значение для крупных мощностей. Однако по последнему каталогу Сименс-Шуккерта песочное и масляное наполнение применяется начиная с 3 kW; зато в отношении частоты пуска наблюдается обратное явление, т. е. уменьшение ее вследствие уменьшения теплоотдачи. Так, обычная норма $h=6$ для плоских металлических реостатов понижается после погружения их в масло в 2—4 раза ($h=1-3$), *) что совершенно понятно, если учесть, что допустимую частоту пуска определяет длительная

мощность реостата, а продолжительность пуска — кратковременная, и вспомнить аналогичное явление в закрытых двигателях с плохой теплоотдачей: отношение кратковременной мощности их к продолжительной тем больше, чем больше постоянная времени

$$T = \frac{C}{A}.$$

Здесь так же, как и в двигателях, играет большую роль величина реостата.

Действительно, из предыдущей главы известно, что теплоотдача после достижения нормальной температуры τ_n (сверх температуры окружающей среды) равна $A = \mu F \tau_n$, где μ — теплоотдача в kW на 1 m^2 при $\tau = 1^\circ \text{C}$. По испытаниям для реостатов $\mu = 0,01 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$.

Но вместе с тем после достижения установившейся температуры τ_n величина A будет соответствовать продолжительной мощности реостата в kW, так как все развиваемое в нем тепло должно удаляться в окружающую среду. Следовательно:

$$P_D = A = \mu F \tau_n.$$

Так как температура масла не допускается выше 80°C при хорошей циркуляции, то, принимая начальную температуру в 25°C , т. е. $\tau_n = 80 - 25 = 55^\circ \text{C}$, имеем:

$$P_D = 0,01 \cdot 55 F = 0,55 \cdot F.$$

Таким образом, для сосуда кубической формы объемом 1 m^3 , т. е. 6 m^2 поверхности, $P_D = 3,3 \text{ kW}$, а для сосуда в 125 раз меньшего объема, т. е. в $0,2 \text{ m}$ в стороне, или поверхностью $0,24 \text{ m}^2$, $P_D = 0,132 \text{ kW}$, в 25 раз меньше. Следовательно, чем больше сосуд, тем худшие условия охлаждения, тем меньше в процентном отношении его длительная мощность и тем меньше он пригоден для частых включений.

Практические исследования завода Сименс-Шуккерта над временем охлаждения масляных реостатов шести различных величин при окружающей температуре 20°C , приводимые в табл. 99, вполне подтверждают сказанное.

Пренебрегая относительно ничтожной теплоотдачей для случая частого включения, можно приблизительно подсчитать объем жидкости ($q \text{ l}$) из расчета, что вся пусковая энергия пойдет на нагрев жидкости и, следовательно,

$$0,119 \times P_{kl} t_b h n = \gamma \cdot c \cdot q \cdot \tau_n, \quad (301)$$

где n — число часов непрерывной работы, $c = 0,4$ — теплоемкость масла (воды = 1), $\gamma = 0,965$ — удельный вес масла (воды = 1), τ_n — нагрев масла = $80 - 25 = 55^\circ \text{C}$.

*) При массовом выполнении плоских реостатов с масляным наполнением можно руководиться следующими указаниями относительно числа включений n в зависимости от продолжительности пуска:

$$\begin{array}{ll} \text{при } t_b = 5 \text{ сек.} & \dots \quad n = 4 \\ t_b = 10 & \dots \quad n = 2 \\ t_b = 15 & \dots \quad n = 1 \end{array}$$

ТАБЛИЦА 99.

Продолжительность пуска		$t = 1,2 \text{ min} = 72$			$t = 1,5 \text{ min} = 90$		
Величина пускового реостата		0	I	II	III	IV	V
Объем масла в литрах		4,5	12	24	55	115	210
Пусковая мощность в л. с.		10	30	50	100	175	250
Пусковая работа (л. с. $\times$ мин)		12	36	60	150	260	375
Время охлаждения в минутах при разности	от 80° до 60° С	21	32	33	47	65	94
	" 60° " 40° С	53	70	73	101	138	200
	" 40° " 30° С	70	86	135	159	240	350
	" 80° " 30° С	144	188	241	307	443	644
	Постоянная времени T в часах	$\frac{2}{3}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$2\frac{1}{4}$	$3\frac{1}{2}$

Итак: $q = 0,00215 \times Pthnl$ для воды

$q = 0,0056 \times Pthnl$ „ масла.

В качестве масла берется обычно трансформаторное или же трансмиссионное масло (очищенное от смолистых и кислотных примесей).

В последнее время по экономическим соображениям вместо масляного применяется песочное наполнение. В качестве такового берется чистый кварцевый песок. Обычный строительный или речной песок не годится вследствие гигроскопичности. Так как теплоемкость песка почти в 2 раза меньше, чем масла, то и емкость реостата с таким наполнением будет соответственно меньше, вес же песка в 2 раза более.

По каталогу фирмы Сименс-Шуккерт массовое изготовление таких реостатов ограничивается малыми мощностями от 3 до 25 kW как для постоянного, так и для трехфазного тока.

Таким образом, мы видим, что наполнение реостатов ведет к увеличению допускаемых значений x и t за счет уменьшения h . Чтобы добиться увеличения всех трех факторов (при тех же размерах), применяется искусственное водяное охлаждение масляных реостатов, о котором будет сказано далее — при описании жидкостных реостатов.

Надо заметить, что наполнение, помимо изменения физических свойств реостата, определяет и отношение его к окружающим условиям, в которых реостат может работать.

При обычном воздушном охлаждении сильный ток воздуха вызывает быстрое загрязнение реостата, если помещение недостаточно чисто, а следовательно запах от пригорающей пыли и даже возможность повреждения.

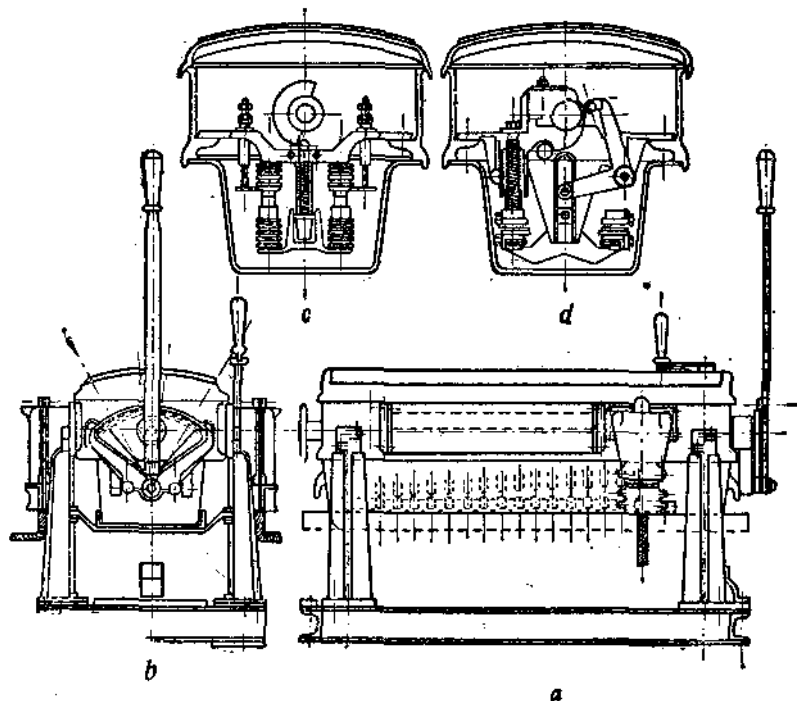
Масляное наполнение делает таким образом реостат особенно пригодным для пыльных помещений.

Если же в масло погружены и контакты реостата, как это было изображено на фиг. 351, то внешние свойства изменяются еще резче, реостат становится пригодным и для установки в атмосфере, наполненной кислотными парами, и даже во взрывчатой, т. е. оказывается „безопасным“ (schlagwettersicher).

Обычно для последней цели реостаты, как и двигатели, выполняются либо герметически закрытыми (газонепроницаемыми), либо снабжаются известной „пластинчатой защитой“ (Plattenschutz) из теплопроводных пластинок, расположенных на расстоянии около 0,5 мм друг от друга.

Однако в виду трудности выполнения первой системы и неудовлетворительности второй при недостаточно тщательном надзоре с успехом применяется погружение всего реостата в масло, особенно при переменном токе.

При постоянном токе, особенно при размыкании больших мощностей, контакты обгорают под маслом даже сильнее, чем на воз-



Фиг. 378.

духе, вследствие перенапряжения, возникающего при быстром выключении, причем масло обугливается.

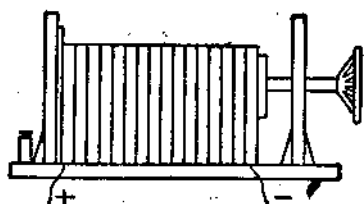
Однако на химических заводах, где контакты и спирали сопротивления разъедаются, полное погружение в масло практикуется и с постоянным током, при небольших мощностях, причем для частых включений лучше всего работают под маслом „накладывающиеся“ контакты (Druckkontakte), а не скользящие.

Такие реостаты, работая безукоризненно при переменном токе, оказались незаменимыми для высокого напряжения.

В отношении стоимости масляных реостатов необходимо указать, что для малых мощностей от 10 до 15 kW они дороже реостатов с воздушным охлаждением на 10—40%, а для мощностей выше 15 kW — дешевле на 10—50%.

На фиг. 378 изображен реостат для привода шахтной лебедки, где разрез с представляет выключатель высокого напряжения для статорной обмотки, остальные — ступенчатый выключатель роторного реостата с контактами, расположенными лестницей (Lattenkontakte).

Для полноты следует указать еще на один принцип регулировки сопротивления не изменением, как обычно, длины или сечения элементов сопротивления (металлического или жидкого), а изменением „сопротивления перехода“ в зависимости от плотности прижатия соприкасающихся поверхностей, т. е. от давления на контактную поверхность.



Фиг. 379.

Этот принцип использован в „графитовых“ реостатах (фиг. 379), сопротивление которых может быть регулируемо не только количеством вложенных в ящик графитовых пластин, но, главным образом, силой сжатия их помощью винта.

Реостаты не получили большого распространения вследствие хрупкости пластин, сильного накаливания и перегорания их от вольтовых дуг, образующихся между пластинами.

§ 6. Методы расчета пусковых реостатов.

Выше, в главе III, мы говорили о способе расчета пускового реостата с помощью механической характеристики, задаваясь плавностью пуска (ΔM_m).

Хотя расчет реостата не входит в задачу настоящего руководства, тем не менее, чтобы показать простоту графического расчета на основе механических характеристик по сравнению с аналитическим, ниже даются оба метода на примере реостата для асинхронного двигателя.

Необходимо обратить внимание на то, что графический метод в этом случае дает меньшую точность, чем для шунтового двигателя, так как кривые линии характеристики асинхронного двигателя заменяются прямыми. Однако и в этом случае точность получается достаточная, как далее будет видно.

а) Аналитический расчет реостата для пуска трехфазного асинхронного двигателя. Определяется идеальный ток короткого замыкания ротора I_k по данным опыта короткого замыкания или по круговой диаграмме (фиг. 380а). По горизонтали откладывается вектор тока холостого хода I_0 . Под углом φ_k откладывается вектор тока короткого замыкания статора. Отрезок AB представляет собой приведенный ток короткого замыкания ротора I'_k . Восставляя из середины AB перпендикуляр, находят центр H окружности. Диаметр AC представляет вектор идеального тока короткого замыкания ротора. Из круговой диаграммы получим:

$$\overline{HB}^2 = \overline{DB}^2 + \overline{DH}^2$$

или

$$\left(\frac{I'_k}{2}\right)^2 = (I_{k0} \cdot \cos \varphi_k)^2 + \left(I_{k0} \cdot \sin \varphi_k - I_0 - \frac{I'_k}{2}\right)^2,$$

По найденным $I_{\min}$ и $I_{\max}$ определяют значения:

$$V_2' = \frac{V_{\phi_1}}{I_{k_1}} \sqrt{I_{k_2}^2 - I_{\min}^2},$$

$$V_2'' = \frac{V_{\phi_2}}{I_{k_1}} \sqrt{I_{k_2}^2 - I_{\max}^2},$$

где V_{ϕ_1} — фазное напряжение ротора, и

$$\beta = \frac{V_2''}{V_1'}.$$

В начале пуска напряжение на роторе V_2 равно

$$V_2'' = I_{\max} \cdot R_1,$$

откуда

$$R_1 = \frac{V_2''}{I_{\max}}.$$

Число ступеней k определится из равенства:

$$R_k = \left(\frac{\beta}{\lambda} \right)^{k-1} R_1,$$

где

$$\lambda = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}},$$

$$k = 1 + \frac{\ln \frac{R_1}{R_k}}{\ln \frac{\lambda}{\beta}}.$$

Пример. Мощность двигателя — 25 kW при 1450 об/мин, напряжение 500 V.

Сопротивление фазы ротора $R_2 = 0,015 \Omega$.

Данные холостого хода: $I_0 = 8A$, $V_2 = 140V$.

Данные короткого замыкания: $I_k' = 20A$; $V_k' = 80 V$, $\cos \varphi_k = 0,3$.

Условия пуска: пусковой момент равен нормальному,

$$\gamma_2 = 1,58; \quad \gamma_1 = 1,8.$$

По опыту короткого замыкания статора:

$$I_{k_1} = \frac{500}{80} \cdot 20 = 125A.$$

По круговой диаграмме идеальный ток короткого замыкания:

$$I_{k_1}' = 125 \frac{125 - 8 \cdot \sin \varphi_k}{125 \sin \varphi_k - 8} = 8,$$

$$\sin \varphi_k = 0,96,$$

$$I_{k_1}' = 125 \frac{125 - 8 \cdot 0,96}{125 \cdot 0,96 - 8} = 8 = 124,2A.$$

Тот же результат получим из чертежа в масштабе вектора ΔC . Пересчитывая на напряжение ротора, получим:

$$I_{k1} = 124,2 \frac{500}{140} = 444 \text{ A.}$$

Далее:

$$I'_{n1} = I_{k1} \sin \beta_n = 444 \cdot 0,065 = 29,1 \text{ A;}$$

$$I_{\min 1} = \gamma_1 \cdot I'_{n1} \cdot \frac{V_1}{V_2} = 1,08 \cdot 29,1 \frac{500}{140} = 112 \text{ A;}$$

$$I_{\max 1} = \gamma_2 \cdot I'_{n1} \cdot \frac{V_1}{V_2} = 1,58 \cdot 29,1 \frac{500}{140} = 164 \text{ A;}$$

$$V_2' = \frac{140}{\sqrt{3} \cdot 444} \sqrt{444^2 - 112^2} = 78,5 \text{ V;}$$

$$V_2'' = \frac{140}{\sqrt{3} \cdot 444} \sqrt{444^2 - 164^2} = 75,1 \text{ V;}$$

$$R_1 = \frac{V_2''}{I_{\max}} = \frac{75,1}{164} = 0,458 \Omega.$$

Далее, по формуле

$$R_k = \left(\frac{\beta}{\lambda} \right)^{k-1} \cdot R_1 \text{ при } \lambda = \frac{1,58}{1,08} = 1,46, \text{ получим:}$$

$$R_2 = \left(\frac{0,975}{1,46} \right)^{2-1} \cdot 0,458 = 0,30 \Omega; R_3 = 0,196 \Omega; R_4 = 0,128 \Omega; R_5 = 0,084 \Omega;$$

$$R_6 = 0,055 \Omega; R_7 = 0,036 \Omega; R_8 = 0,024 \Omega; R_9 = R_a = 0,015 \Omega.$$

б) Графический расчет. Аналогичные результаты, но неизмеримо быстрее, можно получить графически, пользуясь механической характеристикой двигателя. Наклон характеристики, как известно, зависит от сопротивления ротора. Следовательно, отрезок $AB = R_a = 0,015 \Omega$. Величина отрезка равна 2,5 мм. Таким образом 1 мм соответствует сопротивлению в $\frac{0,015}{2,5} = 0,006 \Omega$.

Число ступеней реостата принято равным 8, что дает колебания момента, изображенные на фиг. 380б, в пределах от 16,8 кгм до 11,2 кгм, т. е.

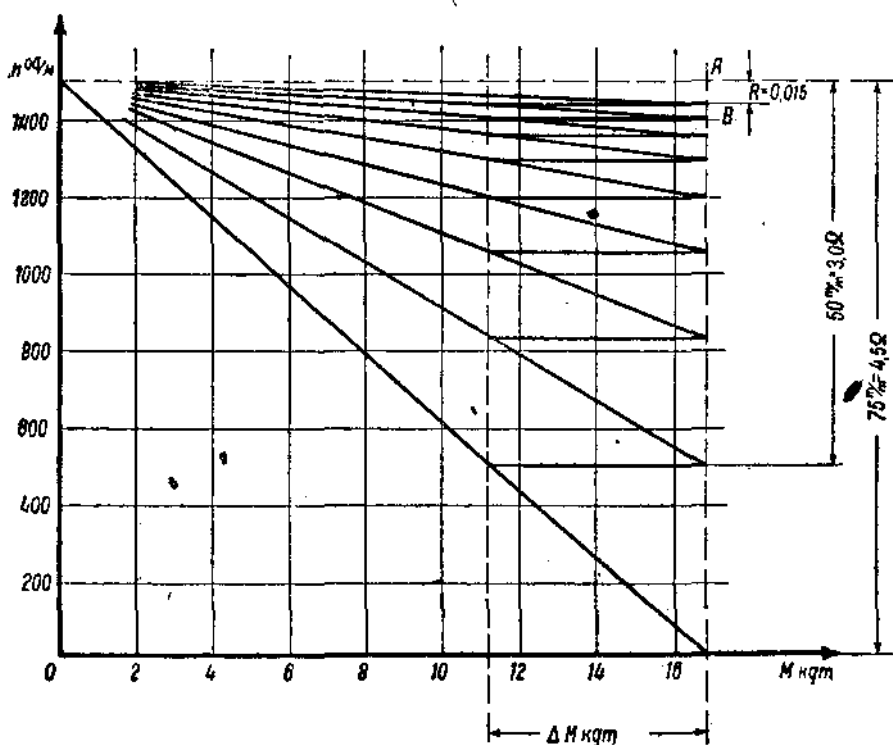
$$\frac{16,8}{11,2} = 1,5 \text{ или } \Delta M = 16,8 - 11,2 = 5,6 \text{ кгм.}$$

Обратно, задаваясь колебанием ΔM , можно получить число ступеней.

Первая ступень R_1 равна по фиг. 380 в 75 мм, что соответствует: *)

$$\begin{aligned} R_1 &= 75 \cdot 0,006 = 0,45 \, \Omega, \\ R_2 &= 50 \quad \quad = 0,30 \, \Omega \\ R_3 &= 38 \quad \quad = 0,198 \, \Omega \\ R_4 &= 22 \quad \quad = 0,132 \, \Omega \\ R_5 &= 14,5 \quad \quad = 0,087 \, \Omega \\ R_6 &= 10,0 \quad \quad = 0,06 \, \Omega \\ R_7 &= 6,5 \quad \quad = 0,039 \, \Omega \\ R_8 &= 4,1 \quad \quad = 0,025 \, \Omega \\ R_9 &= R_a \quad \quad = 0,015 \, \Omega \end{aligned}$$

Графический метод, следовательно, можно рекомендовать как для быстрого определения числа ступеней для данной плавности пуска (ΔM), так и для определения сопротивления секций реостата.



Фиг. 380 в.

Последнюю задачу можно разрешить, пользуясь логарифмической линейкой. Если расстояние по линейке (фиг. 381) между отсчетами 0,015 и 0,458, соответствующими сопротивлению ротора и полному сопротивлению цепи ротора (включая реостат), разделить на 8 равных частей, имея в виду 8 секций реостата, то против отме-

*) На фиг. 380 в вместо 0,45 Ω и 0,3 Ω ошибочно указано 4,5 Ω и 3,0 Ω .

ток деления можно прочесть следующие цифры, очень близко совпадающие с вышеполученными

$$\begin{aligned} R_2 &= 0,29 \, \Omega \\ R_3 &= 0,192 \, \Omega \\ R_4 &= 0,126 \, \Omega \\ R_5 &= 0,083 \, \Omega \\ R_6 &= 0,054 \, \Omega \\ R_7 &= 0,035 \, \Omega \\ R_8 &= 0,023 \, \Omega \\ R_9 &= 0,015 \, \Omega \end{aligned}$$

с) Наконец, в целях иллюстрации применения постоянной времени T реостата ниже приводится тепловой расчет реостата (расчет пускового реостата для шунтового двигателя постоянного тока):

1. Определение величины сопротивления. Обозначим через V — приложенное напряжение в вольтах, i_1 и i_2 — верхний и нижний предел колебания тока, k — число ступеней реостата, R_a — сопротивление обмотки якоря, i — ток полной нагрузки.

В первый момент включения величина сопротивления определится из напряжения V и допускаемого толчка тока i_1 :

$$R_1 = \frac{V}{i_1} \, \Omega;$$

так как скорость и противоэлектродвижущая сила в момент переключения не успевают измениться, то

$$E_1 = V - i_2 R_1 = V - i_1 R_2, \text{ т. е. } i_2 R_1 = i_1 R_2$$

или

$$R_2 = R_1 \frac{i_2}{i_1}.$$

Обозначая $\frac{i_2}{i_1} = \gamma$, получим

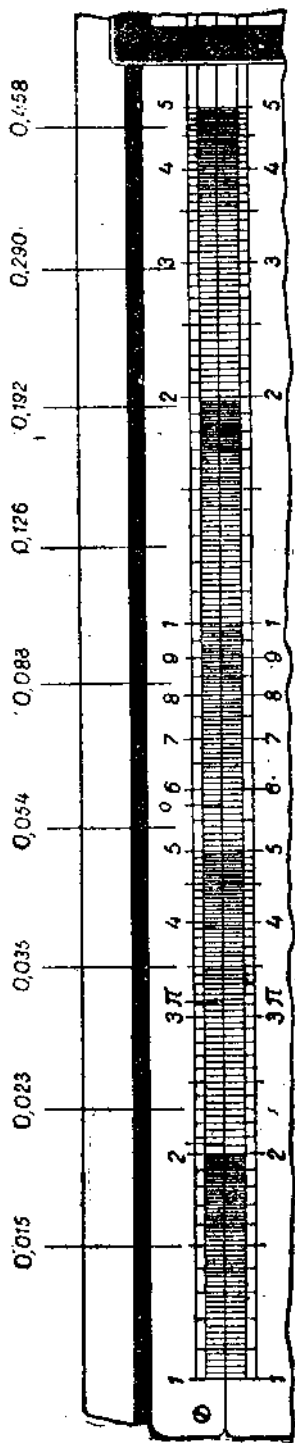
$$R_2 = \gamma \cdot R_1;$$

аналогично:

$$R_3 = \frac{i_2}{i_1} R_2 = \gamma \cdot R_2$$

или, заменяя R_2 , имеем

$$R_3 = \gamma^2 \cdot R_1 \text{ и т. д.}$$



Фиг. 381.

Когда выведена последняя секция реостата,

$$R_m = \gamma^k \cdot R_l \Omega.$$

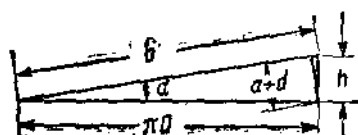
Обычно γ определяется из допустимых пределов колебания тока, задаваемых для расчета.

Сопротивления отдельных секций реостата получаются вычитанием последующего значения из предыдущего.

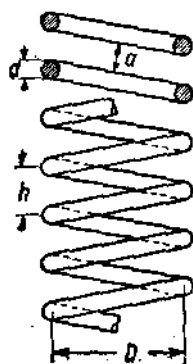
2. Расчет сечения сопротивления и проверка на нагрев. На практике приходится по рассчитанному сопротивлению подбирать мате-

риал и сечение проволоки. Обычно сопротивление в реостатах выполняется в форме спирали, подвешенной вертикально. Если развернуть один виток спирали, то длина его изобразится гипотенузой треугольника с катетами h и πD (фиг. 382):

$$h = \pi D \operatorname{tg} \alpha,$$



Фиг. 382.



$$l = \frac{\pi D}{\cos \alpha} = \frac{h}{\sin \alpha}.$$

Если q — сечение проводника, а i — сила тока, проходящего по нему, то количество тепла, выделяемое числом витков n , будет:

$$W = i^2 R = i^2 \frac{\rho \cdot l}{q} \cdot n = i^2 \frac{\rho \cdot \pi D \cdot n}{q \cdot \cos \alpha}.$$

Отдельные спирали можно рассматривать как сплошные цилиндры, нагреваемые током. Это предположение не оправдывается только в том случае, когда сквозь спирали продувается холодный воздух, что однако на практике почти не встречается.

В установившемся тепловом состоянии [согласно ур-нию (267')] количество тепла, выделяемое спиралями, равно теплу, отдаваемому в окружающую среду, т. е.

$$W = \mu F \cdot \tau = \mu \cdot \pi D \cdot h n \cdot \tau,$$

где μ — количество тепла, выделяемое в 1 сек. с 1 m^2 поверхности, при повышении температуры на $1^\circ C$, F — поверхность спиралей в m^2 , τ — превышение температуры над окружающей средой ($^\circ C$).

Из полученных выражений W с учетом фиг. 382 получим:

$$\frac{i^2 \rho}{\mu \cdot \pi} = q(a + d).$$

Расчет не меняется в случае замены круглой проволоки лентой. В этом случае диаметр проволоки d заменяется шириной ленты.

Для определения возможного времени работы спирали под током, вернее — времени, необходимого для достижения заданной расчетной температуры, необходимо определить так называемую постоянную времени нагревания T , по ур-нию (270) (см. главу VI), как отношение тепло-воспринимающей способности к теплоотдающей:

$$T = \frac{c \cdot G}{\mu \cdot F} = \frac{c \cdot \gamma \cdot l_1 \cdot q \cdot n}{\mu \cdot u \cdot h \cdot n} = \frac{c \cdot \gamma \cdot \pi D \cdot \frac{\pi}{4} d^2}{\mu \cdot \pi D \cdot h \cdot \cos \alpha} = \frac{c \cdot \gamma \cdot \pi d}{4 \mu \left(1 + \frac{a}{d}\right)}, \quad (270')$$

где u — периметр, c — удельная теплоемкость, γ — вес 1 m^3 в граммах.

Проволока способна выдерживать тем большую нагрузку, чем меньше время последняя продолжается. Коэффициент кратковременной нагрузки проводника p_w найдется по данному T и времени нагрузки t_k , как

$$p_w = \frac{T}{t_k}.$$

Величина p_w дает тепловую нагрузку проводников, которая пропорциональна квадрату тока. Следовательно, для нахождения допустимой силы тока необходимо извлечь из p_w квадратный корень, т. е. допускаемая кратко-временно сила тока i_k в течение времени t_k будет равна:

$$i_k = i_D \sqrt{p_w},$$

где i_D — длительно допускаемая сила тока.

ТАБЛИЦА 100.

№	М а т е р и а л	Уд. сопр. p на 1 m и 1 mm^2	Темпера- турный коэффи- циент %/о на 1° C	Уд. вес γ g/cm ³	Уд. тепло- емкость c $\frac{\text{Joule}}{\text{g} \cdot ^\circ \text{C}}$
1	Алюминий	0,03	0,388	2,7	0,88
2	Железная проволока	0,104	0,48	7,7	0,60
3	Константан	0,49	0,005	8,76	0,40
4	Манганин	0,43	0,01	8,2	0,41
5	Никелин	0,35	0,022	9,64	0,39
6	Реотан	0,43	0,023	8,54	0,39
7	Серебро	0,016	0,337	10,5	0,235
8	Медь	0,0176	0,41	8,9	0,39

Пример. Шунтовой двигатель (20 kW при 860 об/мин 229 V, $i = 105$ A) требуется пускать под нагрузкой так, чтобы ток не превосходил двойного нормального, т. е. 210 A. Реостат на 8 контактов. Сопротивле-ние обмотки якоря $R_a = 0,034 \Omega$. Продолжительность пуска $t = 15$ сек.,

$$R_1 = \frac{220}{210} = 1,05 \Omega.$$

По формуле $\gamma = \sqrt[3]{\frac{R_m}{R_1}}$; так как на 8-м контакте все сопротивление выведено и $R_m = R_a = 0,034 \text{ }\Omega$, имеем:

$$\gamma = \sqrt[3]{\frac{0,034}{0,105}} = 0,86.$$

$$i_2 = 0,86 \cdot 210 = 180 \text{ A.}$$

$$R_1 = 0,105 \text{ }\Omega$$

$$R_2 = 0,105 \cdot 0,86 = 0,090 \text{ }\Omega$$

$$R_3 = 0,09 \cdot 0,86 = 0,077 \text{ "}$$

$$R_4 = 0,077 \cdot 0,86 = 0,066 \text{ "}$$

$$R_5 = 0,066 \cdot 0,86 = 0,056 \text{ "}$$

$$R_6 = 0,056 \cdot 0,86 = 0,048 \text{ "}$$

$$R_7 = 0,048 \cdot 0,86 = 0,041 \text{ "}$$

$$R_8 = 0,041 \cdot 0,86 = 0,34 \text{ " (якорь).}$$

Расчет на нагрев произведем в предположении пускового тока 210 А. Допускаемое превышение температуры реостата $\tau = 250^\circ \text{C}$. Материал берем никелин с удельным сопротивлением $\rho = 0,35 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$.

Предположим для простоты, что весь реостат выполнен из проволоки одного диаметра. В распоряжении имеется проволока $\varnothing = 3,5 \text{ mm}$.

Подсчитаем возможность изготовить из нее требуемый реостат.

По ур-нию (270'):

$$T = \frac{c \cdot \pi \cdot d}{4 \cdot \mu \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{d}\right)} = \frac{0,4 \cdot 9,64 \pi \cdot 0,35}{4 \cdot \frac{1}{400} \left(1 + \frac{2d}{d}\right)} = \frac{1700}{4 \cdot 3} = 140 \text{ sec.}$$

Значения c и γ берутся из табл. 100, значения μ — из табл. 101. Практическое соотношение между a и d обычно берется $a \cong 2d$. Отсюда

$$p_w = \frac{T}{t_k} = \frac{140}{15} = 9,3,$$

т. е. данная проволока может выдержать тепловую нагрузку в 9,3 раза против длительной нагрузки. Эта перегрузка будет соответствовать току в 210 А. Допускаемая длительная сила тока будет для данного случая:

$$i_k = 210 = i_D \sqrt{p_w} = i_D \sqrt{9,3}; i_D \cong 70 \text{ A.}$$

Проверим допустимость работы по формуле (267''): для $d = 0,35 \text{ cm}$ и $q = 0,096 \text{ cm}^2$:

$$\tau = \frac{i^2 \rho}{\mu \cdot q (a + d)} (^\circ \text{C});$$

в эту формулу удельное сопротивление ρ подставляется в размерности $\frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\text{cm}}$.

ТАБЛИЦА 101.

Материал	Значения $\frac{1}{\tau}$			Примечания
	Нижний предел	Среднее значение	Высший предел	
Спираль из никелина .	150	400	700	Нижний предел—для искусственно обдуваемого реостата, средний—для находящегося открыто в воздухе, верхний—для заключенного в различного рода кожухи, непроницаемые или плохо проницаемые воздухом
Пакеты из никелина . .	150	250	300	
Фасонные чугунные элементы	500	1 000	1 500	
Трубки вертикальные . .	150	330	500	
„ горизонтальные .	100	250	400	

$$\tau = \frac{70^3 \cdot 0,35 \cdot 10^{-4} \cdot 400}{0,096 \cdot (0,70 + 0,35)} = 690^\circ \text{C}$$

температура недопустимая. Берем две параллельные ветви, каждая из проволоки $D = 0,35$ см. Тогда сила тока в каждой ветви $i_k = \frac{210}{2} = 105$ А. Длительная сила тока:

$$i_D = \frac{i_k}{\sqrt{p}} = \frac{105}{\sqrt{9,3}} \approx 34 \text{ А.}$$

В этом случае

$$\tau = \frac{34^3 \cdot 0,35 \cdot 10^{-4} \cdot 400}{0,096 \cdot (0,7 + 0,35)} = 160^\circ \text{C.}$$

Вторая конструкция реостата приемлема.

Расчет реостата для серийно-двигателя несколько сложнее, так как поток меняется с изменением тока. Необходимо поэтому иметь кривую намагничивания двигателя. В практике пользуются некоторой средней кривой намагничивания (см. „Вестник электропромышленности“, № 12, 1930, стр. 422—427, инж. В. С. Кузнецов). Для упрощения можно рекомендовать пользование номограммой, дающей разбивку общего сопротивления по ступеням в зависимости от числа последних. Общее же сопротивление берется от $R = \frac{V}{i}$ до $R = 1,5 \frac{V}{i}$ в зависимости от рода нагрузки (см. табл. 101).

ТАБЛИЦА 101'.

Нормальные заводские краны				Металлургические краны			
Род крана	Род привода	Ряд нагрузки эл. двигателя	Ряд нагрузки сопрот.	Род крана	Род привода	Ряд нагрузки эл. двигателя	Ряд нагрузки сопрот.
Маломощные краны	Подъем .	II	I	Краны с легкой работой, напр. для смежных валков	Подъем .	II—III	II
	Тележка .	II	I		Тележка .	II—III	II
	Мост . .	II	I		Мост . .	II	III
Краны машинного зала	Подъем .	II	II	Загрузочные машины	Подъем .	II—III	III
	Тележка .	II	I		Тележка, опрокид. поворот . . .	II—III	III
	Мост . .	II	I		Мост . .	III	III
Цеховые складские краны	Подъем .	II	II	Роулганги	—	III—IV	III
	Тележка .	II	I				
	Мост . .	II—III	II				
Литейные краны	Подъем .	II—III	II—III	Разливочные краны	Подъем .	III	I—I
	Тележка .	II	II		Тележка .	III	II
	Мост . .	II—III	II		Мост . .	II—IV	III

§ 7. Жидкостные реостаты.

При изложении оснований для выбора вида металлических реостатов по признакам x , t и h было установлено, что самым существенным из них, определяющим все многообразие видов ступенчатого выключения (Stufenschalter), т. е. контактов, наиболее подверженных износу, является фактор частоты пуска h .

Фактор t определяет главным образом подбор постоянной времени T сопротивления, т. е. размеры или способ укладки последнего (в масле и т. д.). Наконец фактор x определяет калибр определенного вида реостата для одной и той же мощности двигателя.

Таким образом, отсутствия в жидкостных реостатах контактного ступенчатого выключения, определяя прежде всего их место в данной выше классификации, т. е. их подгруппу по числу ступеней, которое можно считать бесконечно большим, *) и, вместе с тем, определяя область применения их (плавного пуска), ставит эти реостаты совершенно особняком в отношении указанных трех признаков.

*) Жидкостные реостаты по намеченной выше классификации отнесены в подгруппу (по числу ступеней) на том основании, что они могут входить в любой класс (пусковых и регулировочных) и в любую группу постоянного и переменного тока, преимущественно, впрочем, последнего.

Число пусков h в виду отсутствия контактов может быть допущено неограниченно большим, при соответствующем подборе теплоотдачи A , и, таким образом, охлаждение этих реостатов приобретает первенствующее значение. При погружении электродов в реку или пруд отпадает и это последнее ограничение для h . В случае малого объема жидкости увеличение A достигается искусственным охлаждением ее. *)

В отношении же продолжительности пуска t жидкостные реостаты резко и выгодно отличаются от металлических благодаря большой тепловоспринимающей способности C и, следовательно, большой постоянной времени T .

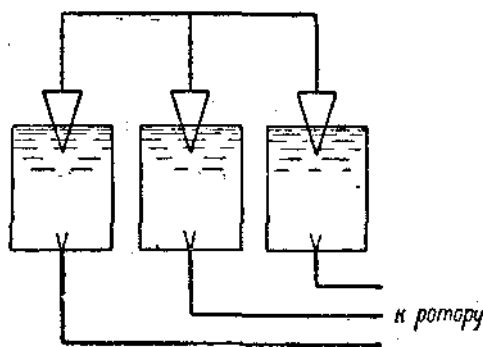
И действительно, мы видим применение этих реостатов как в качестве пусковых для особо тяжелых условий пуска, в смысле продолжительности t , мощности P и пускового тока (коэффициент χ) для пуска особо тяжелых приводов, так и в качестве регулировочных и так называемых реостатов скольжения (Schlupfwiderstand) в установках с маховиками по системе Ильгнер и Леонард-Ильгнер на трехфазном токе, где h и t зависят от неравномерности нагрузки и достигают очень больших значений (при постоянном токе необходимое для работы маховика скольжение осуществляется значительно проще компаундированием двигателя).

По особенностям своей работы (испарение жидкости) жидкостные реостаты могут применяться в определенной категории помещений, нечувствительных к сырости, но в то же время с температурой не ниже точки замерзания жидкости, **) т. е. в прокатных, литейных мастерских, на рудниках, в красильных и отбельных помещениях, текстильных и химических фабриках, следовательно почти исключительно в фабрично-заводских установках.

На фиг. 383 представлена в простейшем виде схема трехфазного реостата, состоящего из трех сосудов, наполненных водой (с добавкой соды), и трех железных листов или „ножей“, опускаемых в сосуды для уменьшения сопротивления.

На фиг. 384 представлен такой же реостат в заводском исполнении; электроды находятся в трех отдельных сосудах, днища которых соединяются с кольцами ротора.

Буквой K обозначены медные контакты короткого замыкания.



Фиг. 383.

*) В жидкостных реостатах массового изготовления на малые и средние мощности до 300 л. с. емкость резервуаров рассчитывается на обычные условия пуска одиночного привода, т. е. число пусков h оказывается ограниченным $h = 2-3$.

**) Добавлением глицерина, алкоголя и т. п. можно значительно понизить температуру замерзания жидкости.

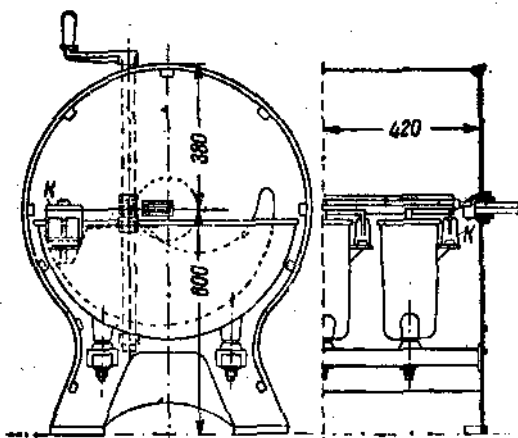
Таким образом сразу выясняется еще одна особенность этих реостатов — так называемое „конечное сопротивление“ (Schlusswiderstand) при полном погружении электродов. Отношение конечного сопротивления к начальному играет очень большую роль и обычно достигает значения $\frac{1}{50}$. Несомненно, что для безударной работы,

при переходе на короткое замыкание металлическими контактами, оно должно быть очень малым, приблизительно равным омическому сопротивлению ротора, и во всяком случае не превосходить 2—5% полного сопротивления его.

Далее, самый принцип устройства этих реостатов определяет преимущественное их применение в переменном токе. В постоянном они значительно менее удобны, особенно для больших значений n и t , вследствие электролитического действия тока, разру-

шения пластин и образования гремучего газа, — правда, в небольшом количестве. Во всяком случае, чтобы предупредить возможность взрывов при постоянном токе, электроды не выводятся из жидкости совершенно, а остаются погруженными на несколько сантиметров.

Надо заметить, что образование газов наблюдается до некоторой степени и при переменном токе, а именно при небольшой частоте его, наблюдаемой в роторной обмотке вблизи синхронного хода двигателя; кроме того оно зависит от рода



Фиг. 384.

жидкости и плотности тока. В качестве жидкости берется большей частью слабый раствор соды. *)

Раствор других солей не применяется вследствие образования осадков при требующихся больших плотностях тока.

Громадным недостатком жидкостных реостатов является зависимость сопротивления электролита от температуры его, меняющейся при работе (R).

В табл. 102 дано удельное сопротивление чистой воды и содового раствора различной концентрации, т. е. сопротивление столбика жидкости сечением 1 mm^2 и длиной в 1 м. Цифры таблицы надо множить на 100 000, чтобы получить сопротивление в омах.

Из таблицы следует, что, например, удельное сопротивление содового раствора в 4,8% при 160° С равно 130 000 Ω , а чистой воды —

*) Завод Сименс-Шуккерт принимает концентрацию в 1—4% с таким расчетом, чтобы при погружении электродов приблизительно на $\frac{1}{2}$ глубины двигатель трогался с места.

7 600 000 Ω , т. е. в 6 раз больше сопротивления при 100° С и в 2¹/₂—3 раза меньше, чем при 20° С.

ТАБЛИЦА 102.

Удельное сопротивление при различных температуре и концентрации раствора соды в сотнях тысяч омов.

Температура С Концентрация	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°
0,0	196	162	139	123	110	100	90	83	76
0,1	88	72	60	51	43	38	33	30	28
0,5	16	14	12	9,8	8,4	7,2	6,3	5,6	5,1
1,0	12	10	8,8	7,6	6,6	5,8	5,2	4,7	4,3
2,9	4,7	3,6	3,0	2,7	2,4	2,2	2,1	2,0	1,9
4,8	3,5	2,9	2,5	2,1	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3
9,1	2,2	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0
23,0	1,3	1,1	0,9	1,8	0,7	0,6	0,55	0,50	0,45

Такая изменяемость сопротивления чрезвычайно затрудняет работу с жидкостными реостатами и требует опытного персонала.

Для поддержания постоянного сопротивления, т. е. температуры жидкости, можно было бы рассчитывать такие реостаты на температуру кипения воды, полагая, что в промежутки между пусками, а особенно в реостатах скольжения, вода не успеет значительно охладиться.

Однако при содовом растворе это невозможно, так как от продолжительного кипения он разлагается с отложением осадков.

При чистой же воде это вполне возможно, и в последнее время жидкостные реостаты с горячей чистой водой (Heisswasseranlasser) в некоторых областях начинают вытеснять обычные жидкостные реостаты с содовым раствором (Flüssigkeitsanlasser).

Большим преимуществом реостатов с „горячей водой“ является то, что в виде пара уносится очень большое количество тепла, и таким образом теплоотдача увеличивается.

Действительно, если допустить повышение температуры охлаждающей циркуляционной воды в реостатах с содовым раствором (равным образом и масляных) в среднем на 40° С, то каждый литр воды будет уносить 40 калорий. Если же допустить парообразование в самой жидкости реостата, то каждый литр унесет в среднем около 600 калорий, т. е. в 15 раз более.

Таким образом, если в реостате с горячей водой на каждую поглощенную реостатом единицу работы (допустим 1 НРн = 634 калориям) требуется около 1 кг воды в виде добавки на место испаряющейся (на 1 kWh около 1,4 кг), то в обычном содовом — 15 и до 60 кг в виде циркуляционной воды в зависимости от температуры входящей и выходящей.

Необходимо однако отметить, что реостаты с горячей водой вследствие меньшей в 80 раз проводимости требуют во столько же раз большей поверхности электродов при одинаковой мощности, что первоначально и препятствовало их распространению. В последних конструкциях таких реостатов электроды ставятся в большом коли-

честве в незначительном расстоянии друг от друга, причем все три фазы (применение в трехфазном токе) помещаются в одном общем сосуде, так что сопротивление между фазами рассчитывается как при соединении треугольником, в то время как при раздельных сосудах — звездой.

При соединении треугольником достигается меньшее конечное сопротивление (Schlusswiderstand), что в жидкостных реостатах чрезвычайно важно.

Наряду с тем, что горячие водяные реостаты могут быть установлены для двигателей очень больших мощностей, они также обладают весьма ценными качествами, каковы: надежность работы, отсутствие потребности в частых осмотрах и разборках для чистки, так как вода дает незначительный осадок, небольшой расход воды сравнительно с жидкостными реостатами с искусственным охлаждением и, наконец, отсутствие охлаждающих устройств.

В табл. 103 приведены данные о пусковых горячих водяных реостатах, изготовляемых в настоящее время фирмой SSW (Сименс-Шуккерт):

ТАБЛИЦА 103.

Мощность мотора				Время пуска в мин.	Максим. длительн. отвод. мощность в kW	Со-дер-жание воды в литрах	Размеры mm				Общий вес рео-стата в kg
Редкий пуск		Частый пуск					Полная вы-сота рео-стата	Ширина реостата	Длина верх-него бака	Длина ниж-него бака	
kW	HP	kW	HP								
900	1220	600	816	3—6	150	1100	1875	1550	2010	1625	2100
1300	1770	900	1220	4—8	220	1400	1875	1550	2410	2025	2800
2200	3000	1500	2040	5—10	370	2000	1875	1550	3230	2825	3400

В указанной таблице под „редким пуском“ следует понимать пуск с полной нагрузкой один раз в 2—3 часа или два раза подряд с последующей паузой в 6—8 часов.

Под частым пуском подразумевается пуск с полной нагрузкой один раз в 30 мин.; если же пуску предшествовала длительная работа с пониженным числом оборотов, то следующий пуск должен быть после паузы в 30 мин.

При расчете жидкостного реостата необходимо иметь в виду, что два электрода (обычно железные листы, толщиной 3 mm = $1/8$ " — в видах необходимой жесткости), по 1 m² поверхности, опущенные в воду температурой 20° C, на расстоянии 4 cm = 0,04 m друг от друга, представляют сопротивление согласно предыдущей таблице 102

в $19600000 \frac{0,04}{1000000} = 0,78 \Omega$, т. е. при напряжении в 500 V ток в реостате будет равен 640 A, нагрузка — 320 kVA.

Обычная допустимая плотность тока на 1 dm² около 30—40 A, т. е. $0,3—0,4 \frac{A}{cm^2}$.

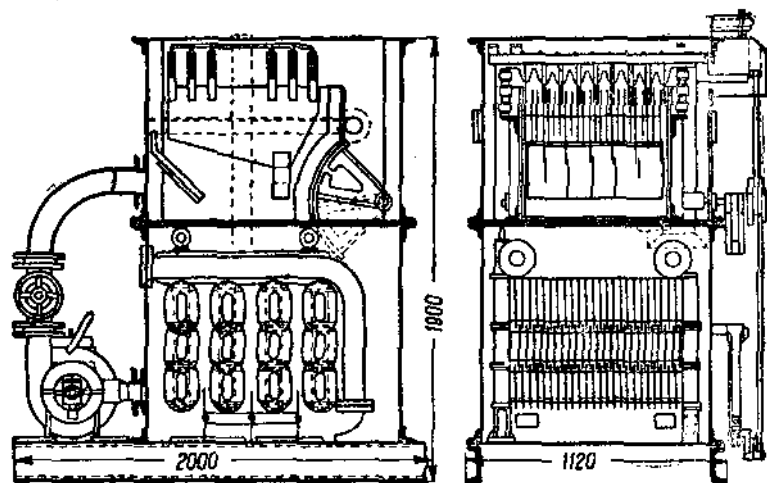
При большей нагрузке или меньшем напряжении устанавливается несколько пластин параллельно, на одинаковом расстоянии друг от

друга, и, соединенные через одну, образуют две группы для двух полюсов при постоянном или однофазном токе n пластин положитель-ных между $n + 1$ отрицательных. Пусть $n = 5$ пластинам при прежнем расстоянии в 4 см. Всего, следовательно, 11 пластин. Тогда общая полезная поверхность их будет в $2n$ раз более, т. е. в 10 раз, и такой реостат менее 1 м^3 объема при 500 V допустит нагрузку в 3200 kW.

В трехфазном токе требуется $3n + 1$ пластин; при соединении электро-дов треугольником пластины включаются по следующей схеме:

в I фазу пластины	1	4	7
во II	2	5	
в III	3	6	

При падении напряжения между двумя электродами менее чем в 150 V и плотности тока менее 1 A на 1 см^2 поглощаемая мощность менее 0,15 kW на 1 см^3 жидкости.



Фиг. 385.

В качестве сосуда может быть взята нефтяная деревянная бочка, просмоленный внутри деревянный ящик, глиняный сосуд, бетонный с изолирующей обкладкой, наконец, как уже сказано, электроды можно опустить непосредственно в воду (реку, пруд), что допус-кается, однако, если цепь не заземлена, например в трехфазном токе при соединении треугольником.

Железные сосуды допускаются только при узких стержневых электродах, т. е. при большом расстоянии их от стенок.

Однако такое устройство мало распространено в виду трудности расчета.

Табл. 104 дает сопротивление между двумя стержневыми электро-дами диаметром в 4 см, по исследованиям завода Симменс-Шуккерт для прямоугольных сосудов (глиняного и железного) размерами $150 \times 26 \times 40$ (длина $\times$ ширина $\times$ высота) для чистой воды темпе-ратурой 15° C .

Для содового раствора и для других температур соответствующие цифры можно получить путем пересчета с помощью предыдущей таблицы.

Вместо опускаемых электродов, иногда для очень крупных мощностей применяются неподвижные; меняется же уровень жидкости помощью перекачивания ее насосами.*)

На рис. 385 представлен такой реостат завода Сименс-Шуккерт для шахтного подъемного трехфазного мотора в 1500 kW.

ТАБЛИЦА 104.

Сосуд	Глубина опуска- ния см	Сопротивление в омах при расстоянии стержней (диаметр — 4 см):								Повышение сопротивле- ния при уменьшении диаметра стержня до	
		5 см	10 см	15 см	20 см	40 см	60 см	80 см	100 см	2 см	1 см
Глиняный сосуд	2	195	255	280	290	330	370	405	445	155	325
	10	69	94	119	134	179	219	264	304	41	93
	20	26	51	71	81	126	166	211	256	24	50
	30	23	38	48	63	103	143	188	233	17	34
	40	16	31	41	51	96	136	181	221	14	27
Железный сосуд (не- изолирован- ный)	2	75	120			185				225	345
	10	41	71	81			89			49	88
	20	26	44	51			56			24	45
	30	20	30	40			43			15	30

Для достижения равномерного ускорения двигателя пластинам придается разная длина так, чтобы при равномерно поднимающемся уровне воды сопротивление падало линейно (расчет их см. Rziha, Starkstromtechnik, B. I, S. 542).

Тем не менее, несмотря на многие преимущества, получающиеся благодаря отсутствию подвижных электродов, этот тип не может быть применен в качестве так называемого „реостата скольжения“ по той причине, что большие количества жидкости не могут быть перекачиваемы в определенные, очень небольшие промежутки времени. Поэтому завод Сименс-Шуккерт для электрификации прокатных станов крупной мощности применяет 2 реостата параллельно: один — большой реостат с горячей водой, с неподвижными электродами и меняющимся уровнем жидкости, другой — значительно меньший, с уравновешенными легкими подвижными электродами, приводимыми в движение очень небольшим вспомогательным электродвигателем, и потому весьма чувствительный и быстродействующий.

Расчет обычных, массового изготовления, жидкостных реостатов для мощностей до 300 HP (по фиг. 294) базируется в виду плохой теплоотдачи на часто встречающихся условиях пуска одиночного привода, а именно $h = 2 - 3$.

При больших мощностях и большей частоте h и продолжительности t применяется искусственное охлаждение, играющее громад-

*) Расчет см. Кулебакин В. С., Пусковые и регулирующие реостаты.

ную роль для, так называемых „емкостных реостатов“ (Kapazitäts-anlasser), т. е. жидкостных, масляных и т. п. Охлаждающая вода обычно циркулирует в трубах.

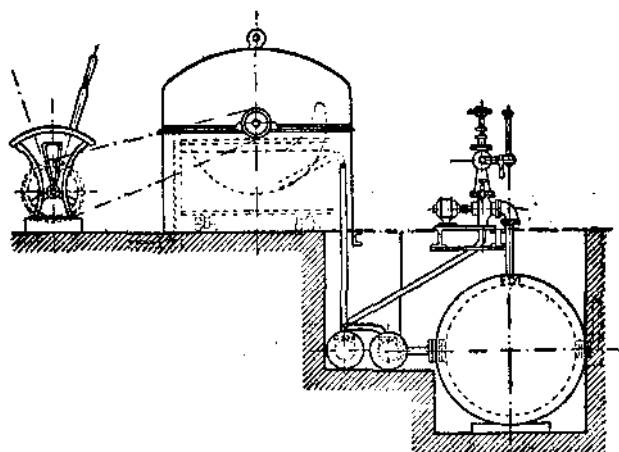
По испытаниям SSW для реостатов с содовым раствором, температурой $70-90^{\circ}\text{C}$, каждый сосуд может взять на себя мощности в зависимости от размеров (при трехфазном токе и трех сосудах — тройная мощность), указанные в табл. 105.

Из табл. 105 видно влияние охлаждения на увеличенные мощности.

Нагрев охлаждающей воды зависит от наружной поверхности труб охладителя, но не может быть допущен большим (в среднем около 12°C), чтобы не получить слишком больших диаметров

трубопроводов. На предыдущем чертеже (фиг. 385) в реостате с переменным уровнем жидкости нижний резервуар служит одновременно охладителем и состоит из системы труб, снабженных ребрами. Но и в обычных масляных реостатах иногда при больших мощностях применяются специальные охладители (см. табл. 106 и 107 для охладителей и циркуляционных насосов фирмы).

Такой охладитель представлен на фиг. 386 для масляного реостата: масло охлаждается приблизительно с 80° до 60°C , вода нагревается от 25° до 35° .



Фиг. 386.

ТАБЛИЦА 105.

Размеры сосуда. Ширина×длина×высота воды	30 × 78 × 34 см		49 × 135 × 52 см	
Охлаждающий водопровод	6,4 м длины, 3,2 см наружн. диаметр		18,5 м длины, 3,2 см наружн. диаметр	
Температура содового раствора на наружных поверхностях .	70° C	90° C	70° C	90° C
Испарение в 1 час	4,2 л	13 л	11 л	27 л
Допускаемая мощность без охлаждения	1,65 kW	3,42 kW	5,0 kW	8,90 kW
То же с охлаждением	7,9 kW	15,0 kW	20,3 kW	45 kW
Количество охлаждающей воды в л/мин	6,8	14,4	20,7	37,2
Температура входящей воды .	14° C	13° C	13° C	13° C
Температура уходящей воды .	26° C	24° C	25° C	26° C

ТАБЛИЦА 106.

Длительно отдаваемая в охладителе мощность kW	Поверхность охладителя m ²	Подводимое количество холодной воды (температура 15—20° C) litre/min	Подводимое количество масла в литрах	Тип	Вес, включая масло, kg	Стоимость без насоса и труб в марках
25	5	37	140	K-450-I	235	830
50	10	75	260	K-450-II	470	1 080
100	20	150	370	K-450-III	760	1 690
150	30	225	580	K-450-IV	1 115	2 180
200	40	300	900	K-450-V	1 410	2 970
250	50	370	1 080	K-450-VI	1 570	3 500
300	60	450	1 500	K-450-VII	1 900	4 100

ТАБЛИЦА 107.

Центробежные электронасосы для охладителей.

Мощность kW	Напряжение V	Тип	Об/мин	Стоимость с эл.-двиг. без реостата марки	Вес kg	Тип эл.-двиг.
1,2	110, 220, 440	S=126/60 II	2 850	715, 650, 650	100	Постоянн. тока EG-5/5
1,2	125/220	—	2 850	500	—	Трехфазного
	220/380	—	—	500	—	
	500	—	—	510	90	ER-41—3 000

При противотоке Δt около 40° C, при разности температуры по обе стороны охлаждающей поверхности в $\tau = 40^\circ \text{C}$, нагреве воды на 10° C и коэффициенте теплоотдачи μ *) имеем теплоотдачу

$$W = \mu F,$$

откуда:

для воды: $F = 0,21 W$; для масла: $F = 0,72 W$.

*) Вода — железо — вода:

$$\mu_w = 0,0403 + 0,00204 \tau = 0,122 \frac{\text{cal}}{\text{m}^2} 1^\circ \text{C}.$$

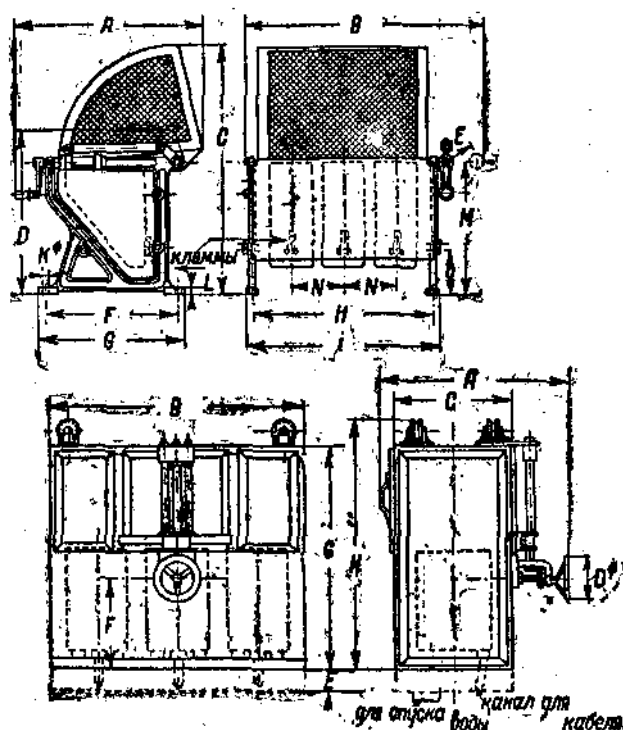
Масло — железо — вода:

$$\mu_o = 0,0114 + 0,00058 \tau = 0,034 \frac{\text{cal}}{\text{m}^2} 1^\circ \text{C}.$$

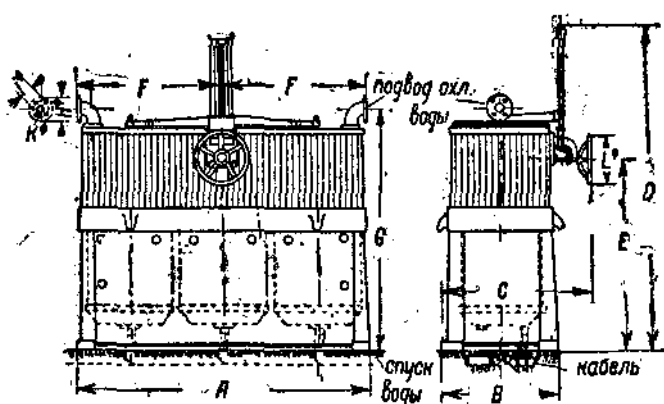
1 калория = 4,199 kW/sec.

Следовательно, поверхность в 1 м^2 передаст в 1 сек при этих условиях:

$$\frac{1}{0,21} = 4,77 \text{ cal/sec} = 20 \text{ kW}; \quad \frac{1}{0,72} = 1,39 \text{ cal/sec} = 5,8 \text{ kW}.$$



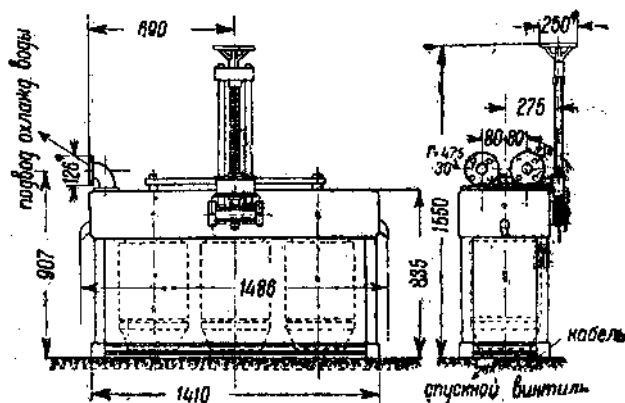
Фиг. 387 а.



Фиг. 387 б.

В табл. 108 приведены основные данные жидкостных реостатов фирмы Саксенверк и стоимость в рублях с учетом накладных расходов на импортное оборудование.

На фиг. 387 приведены чертежи и основные размеры этих реостатов (см. Sachsenwerk, Liste A—21—5, S. 10 и 11).



Фиг. 387с.

ТАБЛИЦА 108.

Жидкостные пусковые реостаты фирмы Саксенверк.

Величина	Жидкость при пуске		Допускаемый ток ротора А	Вес kg	Стоимость руб.	Тип	Напряжение ротора	Примечания
	С полной нагрузкой	С половинной нагрузкой						
1	30	60	150	70	270	DFA	До 500 вольт	Тип рассчитан на длительную регулировку числа оборотов на 15% вниз
2	60	120	250	105	325			
3	125	250	500	230	470.			
4	180	360	500	285	580			
5	600	1 000	750	500	2 000			
6	1 000	2 000	1 200	600	2 650			
1	300	1 500	500	500	1 100	DFK	До 1000 вольт	
2	750	1 000	750	1 000	2 000			
3	1 100	1 500	1 000	1 250	2 500			
4	1 100	2 000	1 200	1 650	3 400			
1	300	—	500	615	1 250	DFKz		
2	750	—	750	1 125	2 300			
3	1 100	—	1 000	1 410	2 800			
4	1 500	—	1 200	1 700	3 750			

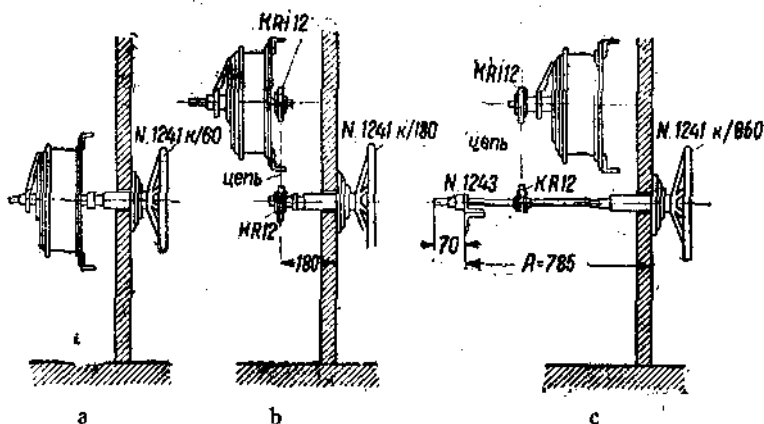
§ 8. Выбор привода реостатов.

Вопрос о выборе привода реостатов ручного управления может возникнуть лишь в исключительных случаях.

1. Прежде всего при установке их за распределительной доской валик реостата соединяется с маховичком на щите либо помощью

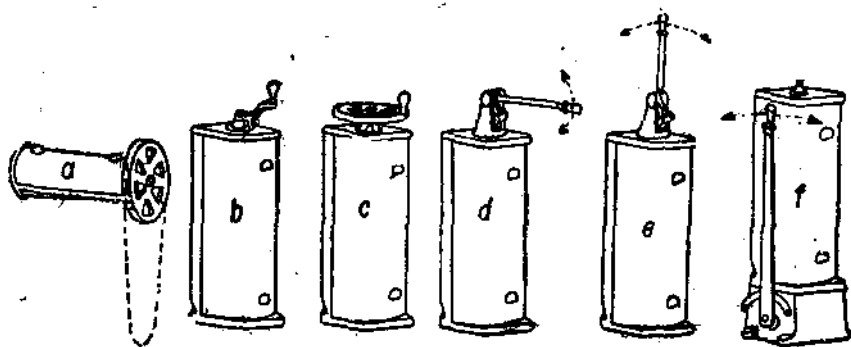
муфты по фиг. 388а, когда оси вала и маховичка совпадают, либо помощью цепной передачи в двух вариантах (фиг. 388б и 388с) в зависимости от расстояния реостата от щита.

2. В случае непосредственной установки реостата на месте работы некоторое затруднение для выбора привода могут предста-



Фиг. 388.

вить крановые контроллеры в виду особенности их местонахождения, иногда недоступного для непосредственного обслуживания, или в крайне стесненном помещении кабинки и условий управления



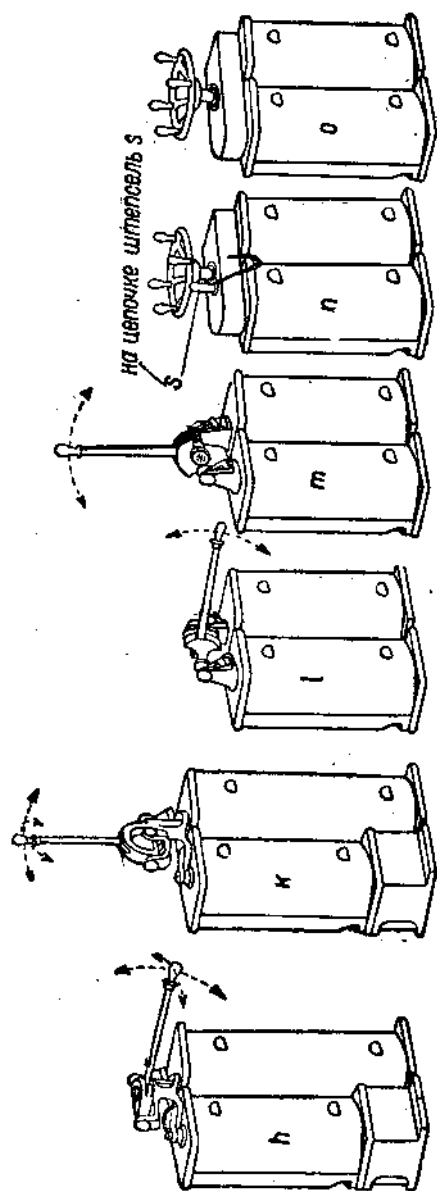
Фиг. 389а.

сложными движениями груза в трех направлениях: вверх, вдоль и поперек мастерской.

На фиг. 389а представлен ряд типичных приводов для одного контроллера, на рис. 389б — для двух.

а) Из них привод контроллера типа „а“ помощью шкива и бесконечного каната или цепи применяется обычно для управления движением крана снизу, например непосредственно с пола мастерской. Если такой привод снабжается сильной пружиной, быстро возвращающей контроллер в начальное положение, то вместо бес-

конечной цепи применяется односторонний канат с рукояткой на высоте роста человека.



Фиг. 389 б.

б) Привод типа „b“ совершается вручную рукояткой, вращаемой в горизонтальной плоскости.

с) Тип „с“ — то же, но вращение в горизонтальной плоскости маховичком.

д) EH — одиночное управление горизонтальным рычагом.

е) EV — то же — вертикальным рычагом.

ф) EU — нижнее управление рычагом.

h) УН — универсальное управление с горизонтальным рычагом, вращаемым как в горизонтальной плоскости, так и в вертикальной.

к) UV — то же с вертикальным рычагом.

l) ДН — двойное управление с горизонтальным рычагом, причем в зависимости от установки его в одном из трех направляющих пазов — левом, среднем или правом — управляется левый контроллер, оба одновременно или один правый. Перевод рычага из одного паза в другой возможен, конечно, только в начальном положении „покоя“.

м) DV — то же с вертикальным рычагом.

п) НВ — двойное управление маховичком, причем установкой шпателя s осуществляется привод того или другого контроллера или обоих вместе.

о) НР — двойное управление маховичком обоих контроллеров параллельно.

Выбор того или другого типа зависит главным образом от рода работы, охарактеризованной уже выше:

1) При нормальной работе обычно применяется маховичок.

2) При управлении пуском и регулировкой для работы на самых незначительных участках пути также удобен маховичок.

3) При тяжелой работе, наоборот, предпочтителен „рычаг“, потому что он облегчает быструю работу, а главное, дает возможность сделать управление весьма наглядным, если выбрать тип ЕН для подъема и ЕУ для передвигания тележки и моста (или соответствующие типы УН и УУ универсального управления), причем направление движения рычага будет соответствовать направлению движения груза.

4) При подъемниках с большим числом включений (например загрузочных машин, штриппер-кранов) универсальное управление уменьшает вдвое число рукояток контроллеров и облегчает быструю работу.

5) Для больших мощностей при электромагнитном управлении применяется рычажный универсальный привод.

6) Нижнее управление ЕУ с длинным рычагом применяется для больших контроллеров и для контроллеров с угольными контактами, требующими больших усилий, преимущественно для роллгангов, прокатных подъемных столов и т. п.

7) Двойное управление применяется для паровозных кранов с двумя подъемными лебедками.

Все вышеприведенные указания сведены в табл. 109.

ТАБЛИЦА 109.

Работа	Число включений в неделю	Мощность контроллера в % от нормальной			Привод контроллера	Примеры применения
		Обычный контроллер	Контроллер с угольн. контакт.	Электромагнитное управление		
Легкая	500				Канатная или маховичок	Подъемники малой мощности
	1 500	125	—	—		Краны в машинных помещениях
Нормальная	2 000	—	—	—	Маховичок, рычаг или универс. управл.	Краны в заводских мастерских, загрузочные машины
	8 000	100	—	125		Краны в прокатных
Пуск и регулировка	10 000	—	—	125	Маховичок	Литейные и заклепочные краны
	12 000	90	—	—		
Тяжелая	12 000	80	125	125	Маховичок, рычаг или универс. управл.	Краны с грейферами Краны для болванок
	18 000	65	100	100		
	30 000	—	100	100		

8. Выбор привода жидкостных реостатов ограничен обычным выполнением в трех вариантах по фиг. 390.

Тип F осуществляет погружение электрода помощью рычага.

Тип В осуществляет погружение электрода помощью рукоятки и червячной передачи (медленное включение).

Тип D оставляет свободным конец вала для управления на расстоянии.

§ 9. Пусковая аппаратура для короткозамкнутых и синхронных двигателей.

Остается сказать несколько слов о пусковых аппаратах особого типа и реостатах прочих классов и групп.

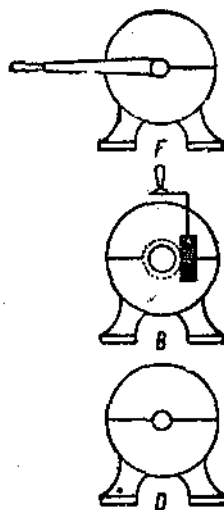
Для короткозамкнутых асинхронных двигателей выбор может быть между тремя типами пусковых аппаратов:

а) простой переключатель со звезды на треугольник, представленный в схеме на фиг. 391. Недостаток его — большой бросок тока от перерыва цепи при переходе со звезды на треугольник.

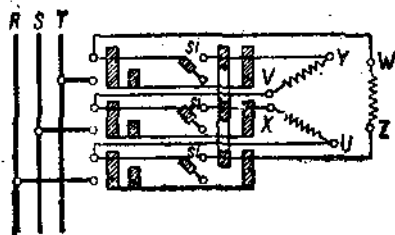
б) Такой же переключатель без перерыва тока при переключении внешне отличается от предыдущего лишь размерами, приблизительно в $1\frac{1}{2}$ раза большими, а начиная с 10 kW имеет те же размеры. Стоимость и вес приблизительно на 10% выше.

Помимо барабанного переключающего приспособления, он заключает в себе еще три дополнительных омических сопротивления, при помощи которых достигается переход со звезды на треугольник без перерыва тока, что ясно видно из схем фиг. 392.

Этот тип переключателей строится



Фиг. 390.



Фиг. 391.

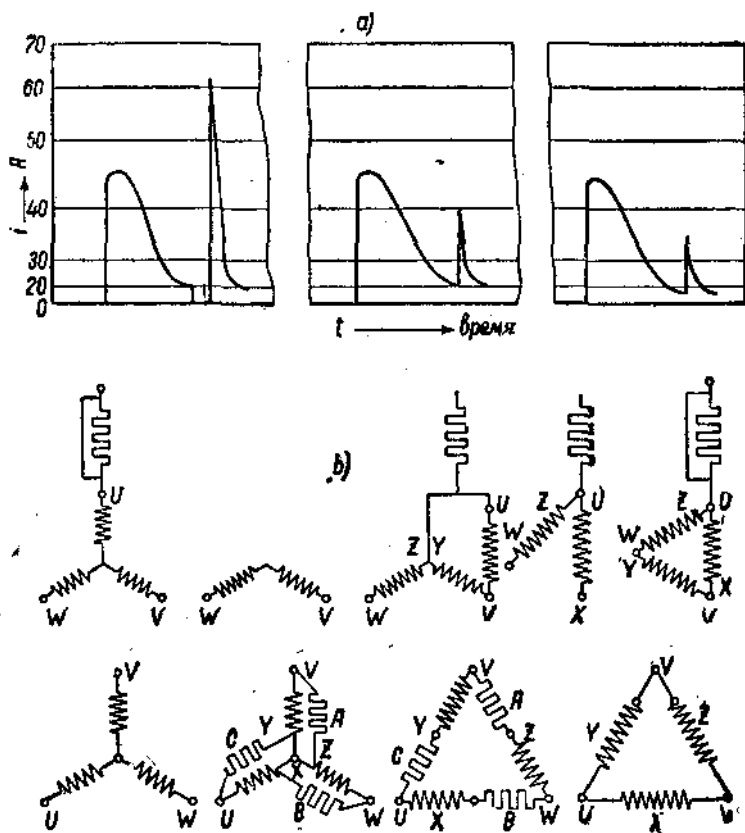
исключительно с предохранителями и для двигателей мощностью от 1 до 30 kW на напряжения 120, 220, 380 и 500 V.

с) Пусковой секционированный трансформатор, имеющий перед двумя предыдущими преимущество в смысле плавности пуска*).

Контактное выключение всех трех типов выполняется в цилиндрической форме, как видно из схем и внешнего вида, и могло бы допустить соответственно большую частоту включения h . Однако для трансформаторов по данным каталогов (см. полный немецкий каталог изд. Сименс-Шуккерта 1913 г.) вводится ограничение для

*) Выше уже был выяснен недостаток общего для всех трех типов принципа действия: понижением подводимого к мотору напряжения, так как последнее связано с понижением пускового момента, пропорционального квадрату напряжения.

$h=3$ и $t \leq 30$ sec., вызываемое очевидно выполнением не контактов, а самого трансформатора, так как для больших значений h и



Фиг. 392.

t предлагается выбирать пропорционально большей мощности последнего.

Например для $h=6$ при двигателе в 50 kW рекомендуется брать пусковой трансформатор соответствующей мощности двигателя,

равной $50 \cdot \frac{6}{3} = 100$ kW. Также для $t=90$ sec. и $h=3$ — на мощность, равную $50 \cdot \frac{90}{30} = 150$ kW.

Сравнительная современная стоимость трех типов в рублях дается в табл. 110.

ТАБЛИЦА 110.

Мощность двигателя в kW	Стоимость в рублях		
	Простого переключателя, тип „а“	Переключателя без переыва, тип „б“	Пуск. трансформатора до 600 V, тип „с“
2,2	82	210	510
4,5	120	210	680
10	195	380	1000

Для самопуска синхронных двигателей аппаратура аналогична аппаратуре короткозамкнутых асинхронных двигателей. Однако для мощных двигателей применяется иная схема (Коридорфер).

Пусковая аппаратура для синхронных двигателей. В практике американских установок привились только два способа пуска синхронных двигателей: 1) пуск непосредственным включением в сеть и 2) пуск от пониженного напряжения через автотрансформатор или дроссель.

Все двигатели, изготавливаемые фирмой GEC приспособлены для пуска от полного напряжения сети, поэтому выбор одного из вышеупомянутых способов пуска определяется не свойствами синхронного двигателя, а требованиями станции или привода. Пусковой ток синхронных двигателей GEC равен примерно пусковому току короткозамкнутого двигателя такой же мощности и того же числа оборотов, т. е. $i_A = (4-8)i_{ном}$. Пусковой момент составляет от 1,1

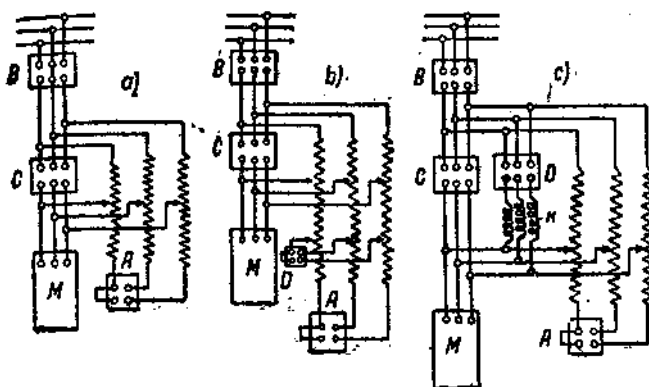
до 1,6 нормального. В крупных (прокатных) двигателях момент при пуске выше, чем в нормальных малых. Так, например, синхронный двигатель в 9000 л. с. при 107 об/мин 25 пер. 6600 V при включении на полное напряжение дает пик в 48 200 kVA при моменте, равном 2,65 нормального.

А. В двигателях средней мощности пусковая аппаратура стандартизована и состоит из автотрансформатора с тремя ответвлениями для 80, 65 и 50% от полного напряжения, что дает толчок

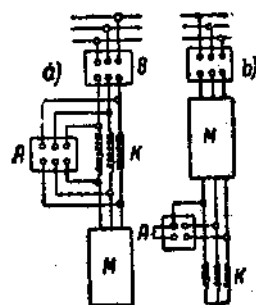
тока в 64,42 и 25% от того, который был бы при включении на полное напряжение. Обычно применяется только одно ответвление, диктуемое требуемым пусковым моментом, чаще всего 65%, при котором пусковой момент M_A равняется нормальному при толчке тока, равном 2—3-кратному нормальному. Неприятным явлением в указанной системе пуска является перерыв тока при переходе на полное напряжение. Правда, получающийся при этом толчок тока столь кратковременен, что улавливается только осциллографом, тем не менее механические усилия, возникающие в обмотке двигателя, настолько велики, что должны учитываться при конструировании машины. По имеющимся указаниям схему пуска с разрывом цепи не следует применять при мощности выше 250 kW. Принципиальные схемы включения статора показаны на фиг. 393а и 393б. Для двигателей мощностью до 1700 kW фирма GEC применяет специальную панель с масляной аппаратурой.

Обе указанные схемы требуют трех последовательных операций при пуске: 1) включения на пониженное напряжение, 2) переключения на полное напряжение, 3) переключения на синхронную работу.

В. Для устранения этих неудобств пуска фирма GEC разработала схему полуавтоматического пуска, в которой автоматизировано управление цепью возбуждения, что освобождает обслуживающий персонал от необходимости следить за переходом на синхронный режим. Для осуществления указанного автоматического перехода добавляется контактор для приключения обмотки



Фиг. 394.



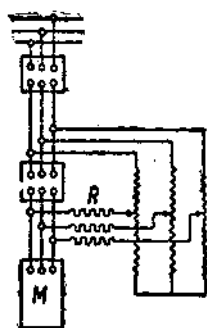
Фиг. 395.

возбуждения (тип CR-1135), происходящего по достижении 95% нормальной скорости.

С. В последнее время фирма GEC разработала схему автоматического пуска — чрезвычайно простую по манипуляциям, но, конечно, самую сложную по конструкции. Схема выполняется стандартно, причем нажатие одной кнопки заменяет все ранее описанные операции пуска. Область применения такого стандартного устройства ограничивается 350 kW при 220 V и 550 kW при 2200 V (тип GR 7061). При пуске под полным напряжением автотрансформатор отпадает.

В Германии пусковые автотрансформаторы, преимущественно без разрыва цепи, выполняются для малых мощностей, главным образом для короткозамкнутых асинхронных двигателей, так как синхронные двигатели с самопуском большого распространения не получили.

Д. Двигатели крупных мощностей, обычно пускаются по схеме Коридорфера. Последняя отличается от вышеописанных тем, что при переходе с одного пускового положения на другое часть обмотки трансформатора работает как дроссельная катушка, вследствие чего все переходные манипуляции производятся без отсоединения двигателя от сети. Принципиальная схема Коридорфера дана на фиг. 394, а. Для пуска включаются масляники А и В. Двигатель приходит в движение и разгоняется до 95% синхронной скорости. Вслед за этим включается слабое возбуждение, вследствие чего двигатель входит в синхронизм, масляник А отключается, и двига-



Фиг. 396.

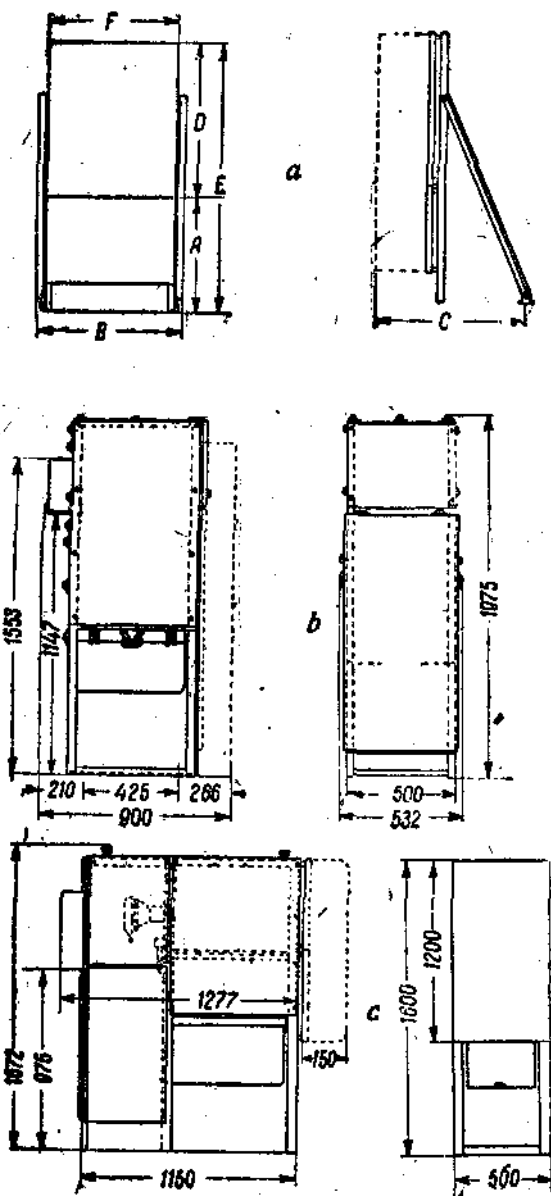
тель остается включенным через дроссель (верхняя часть трансформатора схемы). Затем включается масляник *C*, и дается полное возбуждение.

В простейшей схеме Коридорфера нужны пять последовательных операций, которые при ручном управлении требуют большого внимания и определенной квалификации обслуживающего персонала.

При необходимости иметь две пусковых ступени напряжений применяется автотрансформатор с двумя отведениями, что влечет добавление четвертого масляника (фиг. 394, *b*). Порядок пуска по схеме с двумя ступенями тот же, что и с одной. Схема (фиг. 394, *b*) видоизменяется в некоторых случаях схемой (фиг. 394, *c*), в которой вторая ступень автотрансформатора заменена дроссельной катушкой *K*. Смысл применения последней заключается в том, что при пуске от автотрансформатора или через дроссель получают различные кривые вращающих моментов при пуске. При одном и том же толчке пускового тока начальный вращающий момент будет при автотрансформаторе больше, а нормальный момент меньше. Кривые (фиг. 216, глава IV) иллюстрируют это различие механических характеристик. Следовательно, применение дросселя в схеме Коридорфера дает возможность перейти к концу пуска на более благоприятную характеристику вращающего момента, что бывает необходимо в приводах с вентилаторным моментом.

Е. Помимо указанных схем, фирма GEC приме-

няет схему пуска только через дроссель *K*, который по достижении синхронизма шунтируется масляником *A* (фиг. 395, *a* и *b*). Вторая



Фиг. 397.

схема имеет то преимущество перед первой, что масляник ее защищен на случай короткого замыкания сопротивлением обмотки двигателя. Однако в этой схеме необходимо иметь шесть выведенных концов обмотки статора, что удорожает установку.

Фирма Вестингауз (фиг. 396) для понижения пускового напряжения пользуется вспомогательным омическим сопротивлением R . Схема также совершенно автоматизирована, и для пуска требуется нажатие одной лишь кнопки.

В табл. 111 и 112 приведены данные фирмы GEC о стоимости пусковой автоматической аппаратуры типа CR-7061-Q3 для напряжений 220, 440 и 550 V и типа CR-7061-S3 для 2200 V в долларах.

На фиг. 397 указаны габариты пусковых панелей, причем низковольтные даны на фиг. 397, а, а высоковольтные — фиг. 397, б и с.

§ 10. Регулировочные реостаты и „кнопочное„ управление.

В отношении подгруппы реверсивных реостатов можно заметить, что в виду выяснившейся из предыдущего крайней сложности, особенно для трехфазного тока, применение их может быть оправдываемо только действительной необходимостью, как, например, в управлении кранами — удобным и простым манипулированием при частом реверсировании. При редком — применение отдельного переключателя не вызовет большого усложнения в управлении, но зато сильно упростит и удешевит реостат.

В автоматических реостатах для лифтов в последнее время выключатель и переключатель также выделяются из реостата в особый аппарат, что уменьшает число контактов реостата и увеличивает быстроту действия автоматического управления.

Наконец в отношении класса регулировочных и комбинированных реостатов к сказанному выше следует прибавить, что наиболее употребительной формой контактного выключателя является для них — плоская (Flachbahn), которая в случае незначительной силы тока (например в шунте) не ставит ограничения для числа включений n . Естественно, что в виду большой продолжительности включений t , элементы сопротивления рассчитываются на длительную нагрузку, и, следовательно, монтаж их должен обеспечить достаточную теплоотдачу. Таким образом здесь выбирается исключительно воздушное охлаждение. Только в качестве „реостатов скольжения“ для трехфазного тока применяются жидкостные реостаты, но с рассчитанным соответственно искусственным воздушным охлаждением.

В отношении плавности регулировки обычное число контактов колеблется между 5—30, в зависимости от мощности. Чтобы избежать чрезмерного удорожания регулировочных реостатов вследствие специального изготовления с большим числом контактов в случаях очень плавной регулировки и в широких пределах (бумажные машины, каландры и т. п.), можно применить два регулировочных реостата: один — с небольшим числом грубых ступеней (Grobregler); другой — с большим числом мелких ступеней (Feinregler), но для регулировки в пределах одной грубой ступени.

В качестве таких реостатов (Feinregler) можно было бы указать на так называемые Рустратовские реостаты (Ruhstrat in Göttingen) как на особую форму ступенчатого выключения, где щетка

ТАБЛИЦА 111.

Пусковая аппаратура для синхронных двигателей типа CR-7061-Q3.

Сила тока А:		Напряжение 220 В		Напряжение 440 В		Напряжение 550 В	
Линии	Поля	№ каталога	Цена долл.	№ каталога	Цена долл.	№ каталога	Цена долл.
15 — 28	3 — 6	3881963-G-2	455	3881963-G-30	455	3881963-G-58	455
15 — 28	6,1—13	- 3	455	-81	455	-59	455
15 — 28	13,1—29	- 4	455	-32	455	-60	455
15 — 28	29,1—75	- 5	455	-33	455	-61	455
28,1— 35	3 — 6	- 6	455	-34	455	-62	455
28,1— 35	6,1—13	- 7	455	-35	455	-63	455
28,1— 35	13,1—29	- 8	455	-36	455	-64	455
28,1— 35	29,1—75	- 9	455	-37	455	-65	455
40,1— 50	3 — 6	-10	455	-38	455	-66	455
40,1— 50	6,1—13	-11	455	-39	455	-67	455
35,1— 40	3 — 6	-10	455	-38	455	-66	455
35,1— 40	6,1—13	-11	455	-39	455	-67	455
35,1— 40	13,1—29	-12	455	-40	455	-68	455
35,1— 40	29,1—75	-13	455	-41	455	-69	455
40,1— 50	3 — 6	-14	455	-42	455	-70	460
40,1— 50	6,1—13	-15	455	-43	455	-71	460
40,1— 50	13,1—29	-16	455	-44	455	-72	460
40,1— 50	29,1—75	-17	455	-45	455	-73	460
51 — 60	3 — 6	-18	455	-46	480	-74	480
51 — 60	6,1—13	-19	455	-47	480	-75	480
51 — 60	13,1—29	-20	455	-48	480	-76	480
51 — 60	29,1—75	-21	455	-49	480	-77	480
61 — 70	3 — 6	-22	455	-50	480	-78	480
61 — 70	6,1—13	-23	455	-51	480	-79	480
61 — 70	13,1—29	-24	455	-52	480	-80	480
61 — 70	29,1—75	-25	455	-53	480	-81	480
71 — 75	3 — 6	-26	455	-54	480	-82	480
71 — 75	6,1—13	-27	455	-55	480	-83	480
71 — 75	13,1—29	-28	455	-56	480	-84	480
71 — 75	29,1—75	-29	455	-57	480	-85	480
76 — 85	3 — 6	3881964-G-2	590	3881964-G-18	600	3881964-G-34	605
76 — 85	6,1—13	- 3	590	-19	600	-35	605
76 — 85	13,1—29	- 4	590	-20	600	-36	605
76 — 85	29,1—75	- 5	590	-21	600	-37	605
86 —110	3 — 6	- 6	590	-22	605	-38	610
86 —110	6,1—13	- 7	590	-23	605	-39	610
86 —110	13,1—29	- 8	590	-24	605	-40	610
86 —110	29,1—75	- 9	590	-25	605	-41	610
111 —135	3 — 6	-10	610	-26	615	-42	615
111 —135	6,1—13	-11	610	-27	615	-43	615
111 —135	13,1—29	-12	610	-28	615	-44	615
111 —135	29,1—75	-13	610	-29	615	-45	615
136 —150	3,6— 6	-14	615	-30	620	-46	670
136 —150	6,1—13	-15	615	-31	620	-47	670
136 —150	13,1—29	-16	615	-32	620	-48	670
136 —150	29,1—75	-17	615	-33	620	-49	670

Сила тока А		Напряжение 220 В		Напряжение 440 В		Напряжение 550 В	
Линии	Поля	№ каталога	Цена долл.	№ каталога	Цена долл.	№ каталога	Цена долл.
151—190	3 — 6	3881965-G-2	720	3881965-G-14	745	3881965-G-26	775
151—190	6,1—13	- 3	720	-15	745	-27	775
151—190	13,1—29	- 4	720	-16	745	-28	775
151—190	29,1—75	- 5	720	-17	745	-29	775
191—250	3 — 6	- 6	855	-18	885	-30	915
191—250	6,1—13	- 7	855	-19	885	-31	915
191—250	13,1—19	- 8	855	-20	885	-32	915
191—250	29,1—75	- 9	855	-21	885	-33	915
251—300	3 — 6	-10	965	-22	995	-34	1005
251—300	6,1—13	-11	965	-23	995	-35	1005
251—300	13,1—29	-12	965	-24	995	-36	1005
251—300	29,1—75	-13	965	-25	995	-37	1005
301—325	3 — 6	3881966-G-2	1300	3881966-G-22	1325	3881966-G-42	1425
301—325	6,1—13	- 3	1300	-23	1325	-43	1425
301—325	13,1—29	- 4	1300	-24	1325	-44	1425
301—325	29,1—75	- 5	1300	-25	1325	-45	1425
326—375	3 — 6	- 6	1360	-26	1380	-46	1425
326—375	6,1—13	- 7	1360	-27	1380	-47	1425
326—375	13,1—29	- 8	1360	-28	1380	-48	1425
326—375	29,1—75	- 9	1360	-29	1380	-49	1425
376—425	3 — 6	-10	1485	-30	1485	-50	1500
376—425	6,1—13	-11	1485	-31	1485	-51	1500
376—425	13,1—29	-12	1485	-32	1485	-52	1500
376—425	29,1—75	-13	1485	-33	1485	-53	1500
426—525	3 — 6	-14	1485	-34	1585	-54	1600
426—525	6,1—13	-15	1485	-35	1585	-55	1600
426—525	13,1—29	-16	1485	-36	1585	-56	1600
426—525	29,1—75	-17	1485	-37	1585	-57	1600
526—600	3 — 6	-18	1495	-38	1600	-58	1600
526—600	6,1—13	-19	1495	-39	1600	-59	1600
526—600	13,1—29	-20	1495	-40	1600	-60	1600
526—600	29,1—75	-21	1495	-41	1600	-61	1600

ТАБЛИЦА 112.

Пусковая аппаратура для синхронных двигателей типа CR-7061-S3 для напряжения 2200 В.

Сила тока А		№ по каталогу	Цена в долл.	Приблизит. вес в англ. фунтах
Линии	Поля			
8—9	3 — 6	3881967-G-2		
8—9	6,1—13	- 3		
8—9	13,1—29	- 4	930	1100
8—9	29,1—75	- 5	930	1100
			930	1100
			930	1100

Сила тока А		№ по каталогу	Цена в долл.	Приблизит. вес в англ. фунтах
Линии	Поля			
9,1—12	3—6	3881967-G-6	935	1100
9,1—12	6,1—13	-7	935	1100
9,1—12	13,1—29	-8	935	1100
9,1—12	29,1—75	-9	935	1100
12,1—15	3—6	-10	940	1180
12,1—15	6,1—13	-11	940	1180
12,1—15	13,1—29	-12	940	1180
12,1—15	29,1—75	-13	940	1180
15,1—17	3—6	-14	940	1180
15,1—17	6,1—13	-15	940	1180
15,1—17	13,1—29	-16	940	1180
15,1—17	29,1—75	-17	940	1180
17,1—21	3—6	-18	950	1180
17,1—21	6,1—13	-19	950	1180
17,1—21	13,1—29	-20	950	1180
17,1—21	29,1—75	-21	950	1180
21,1—26	3—6	-22	965	1320
21,1—26	6,1—13	-23	965	1320
21,1—26	13,1—29	-24	965	1320
21,1—26	29,1—75	-25	965	1320
26,1—34	3—6	-26	965	1320
26,1—34	6,1—13	-27	965	1320
26,1—34	13,1—29	-28	965	1320
26,1—34	29,1—75	-29	965	1320
34,1—40	3—6	-30	980	1320
34,1—40	6,1—13	-31	980	1320
34,1—40	13,1—29	-32	980	1320
34,1—40	29,1—75	-33	980	1320
40,1—50	3—6	-34	985	1320
40,1—50	6,1—13	-35	985	1320
40,1—50	13,1—29	-36	985	1320
40,1—50	29,1—75	-37	985	1320
50,1—60	3—6	-38	1070	1400
50,1—60	6,1—13	-39	1070	1400
50,1—60	13,1—29	-40	1070	1400
50,1—60	29,1—75	-41	1070	1400
60,1—75	3—6	-42	1070	1600
60,1—75	6,1—13	-43	1070	1600
60,1—75	13,1—29	-44	1070	1600
60,1—75	29,1—75	-45	1070	1600
76—100	3—6	3881968-G-2	1440	2950
76—100	6,1—13	-3	1440	2950
76—100	13,1—29	-4	1440	2950
76—100	29,1—75	-5	1440	2950
101—125	3—6	-6	1440	2950
101—125	6,1—13	-7	1440	2950
101—125	13,1—29	-8	1440	2950
101—125	29,1—75	-9	1440	2950
126—150	3—6	-10	1450	3100
126—150	6,1—13	-11	1450	3100
126—150	13,1—29	-12	1450	3100
126—150	29,1—75	-13	1450	3100

передвигается не по контактам, а непосредственно по виткам голой проволоки, служащей сопротивлением и намотанной на изолированном каркасе.

Надо однако заметить, что реостаты эти довольно быстро изнашиваются при интенсивной работе от трения щетки и от температурных деформаций (выпачивание отдельных витков).

Регулировочные реостаты для серийс-моторов постоянного тока и асинхронных могут быть применяемы и в качестве пусковых (но не обратно), так как регулировка главным током хотя и не экономична, *) но наиболее проста в этих случаях. Несомненно, что охлаждение должно быть воздушное и элементы сопротивления рассчитаны на продолжительную нагрузку, что значительно удорожает реостат по сравнению с пусковым, как видно из табл. 113а, составленной для двигателей постоянного тока, и табл. 113б фирмы ВВС.

ТАБЛИЦА 113а.

Мощность двигателя kW	Пусковой реостат		Регулировочный реостат для регулирования вниз на					
			25%		50%		75%	
	Стои- мость	Вес	Стои- мость	Вес	Стои- мость	Вес	Стои- мость	Вес
В п р о ц е н т а х								
0,5	100	1,8	200	3,0	310	4,0	370	4,5
0,75	100	2,0	260	4,0	310	4,5	400	5,5
1,5	100	2,8	340	5,5	400	6,0	420	12,0
3,1	100	4,5	340	15,0	400	16,0	570	25,0
6,2	100	6,5	310	18,0	370	25,0	450	30,0
8,8	100	12	330	23,0	400	27,0	510	45,0

ТАБЛИЦА 113б.

Сравнительная стоимость (в процентах) комбинированных реостатов по данным ВВС.

Мощность электродвигателя	Пределы регулирования		
	+ 30% — 25%	+ 30% — 50%	+ 30% — 75%
0,5	42	47	55
0,75	47	53	66
1,5	66	75	85
3,0	97	110	142
6,0	155	180	200
7,5	165	197	240

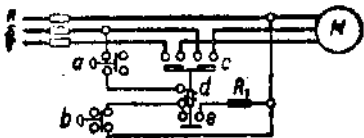
*) Если такой мотор мощностью P kW должен регулироваться на $m\%$ вниз от нормальной скорости, то количество калорий, продолжительно отводимых от реостата, будет равно $q = \frac{mP}{100 \cdot 4,199} = 0,238 \cdot \frac{mP}{100} \cdot \frac{\text{cal}}{\text{sec}}$

Из комбинированных реостатов распространением пользуются только плоские металлические реостаты для шунтовых двигателей постоянного тока, выпускаемые в массовом изготовлении в четырех вариантах (для специальных широко регулируемых шунтовых моторов):

- 1) для регулировки вверх на 30%,
- 2) то же вверх на 30% и кроме того вниз на 25%,
- 3) то же вверх на 30% и вниз на 50%,
- 4) то же вверх на 30% и вниз на 75%.

В дополнение к краткой характеристике современной автоматической пусковой аппаратуры, данной выше, здесь уместно будет привести несколько принципиальных схем автоматического кнопочного управления станков.

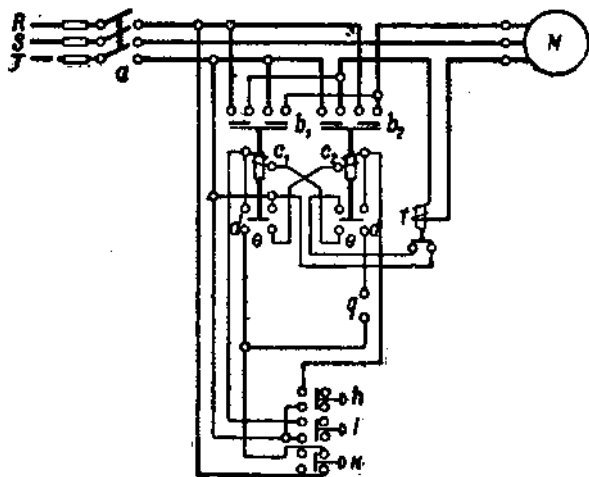
1) Простейшей из них является схема управления короткозамкнутого двигателя переменного тока при условии автоматизации только одного пуска. На фиг. 398 реле *d* замыкает электрическую цепь двигателя при нажатии пусковой кнопки *b*. Другая кнопка *a* служит для остановки. Питание реле, после того как пусковая кнопка нажата, осуществляется через дополнительный контакт *e*, замыкаемый самим же реле. Сопротивление *R* служит для ограничения тока реле, после того как оно сработало.



Фиг. 398.

2) Если от электрического привода с короткозамкнутым двигателем требуется и реверсирование, то схема несколько усложняется введением второго реле, причем оба реле, служащие для пуска двигателя в ту и другую сторону, между собой заблокированы, как это видно из фиг. 399, так что при замкнутой цепи одного реле цепь второго непременно разомкнута: этим устраняется возможность короткого замыкания.

Привод управляется уже тремя кнопками. В случае перегрузки максимальное реле *f* размыкает цепь пускового реле, и привод останавливается. Как видно из схемы, защита от перегрузки работает лишь при одном направлении вращения двигателя, что соответствует требованиям работы на большинстве станков.



Фиг. 399.

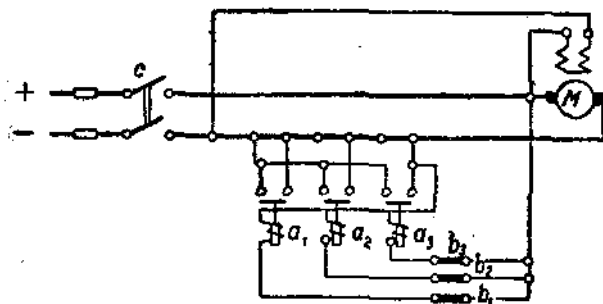
3) Управление приводом еще более усложняется, если применяется электрический двигатель с пусковым реостатом. Существует чрезвычайно большое число различных систем автоматизации такого управления, — на фиг. 400,

401, 402 и 403 приведены наиболее часто встречающиеся. Схема управления фиг. 400 состоит в том, что ряд реле, выключающих секции пускового реостата, параллельно приключены к якору двигателя через различные сопротивления $b_1, b_2, \dots$ и по мере разворачивания двигателя последовательно приходят в действие одно за другим под влиянием растущей противоэлектродвижущей силы.

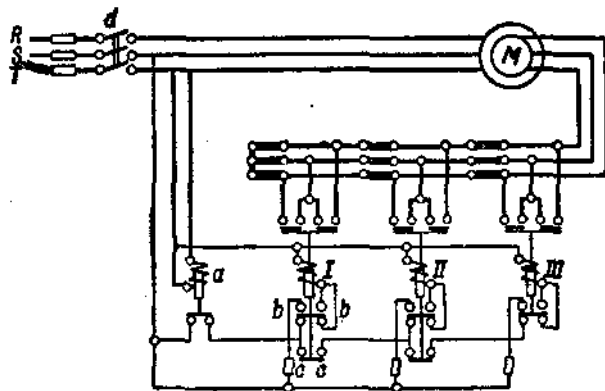
Принцип устройства автоматического управления фиг. 401 состоит в том, что пусковые реле между собой заблокированы так, что одно реле может подействовать лишь после того, как сработало другое реле.

Постепенное отключение секций пускового реостата можно осуществить через посредство одного реле, как это указано на фиг. 402, но в таком случае это реле должно обладать каким-нибудь демпфером, который бы замедлял перемещение рукоятки пускового реостата. В этой схеме реле a главной цепи двигателя одновременно с этим включает и реле c , снабженное демпфером и действующее на рукоятку комбинированного реостата A . В конце пуска рукоятка отжимает поворотный рычаг и тем самым включает в цепь реле c сопротивление, ограничивающее силу проходящего через него тока.

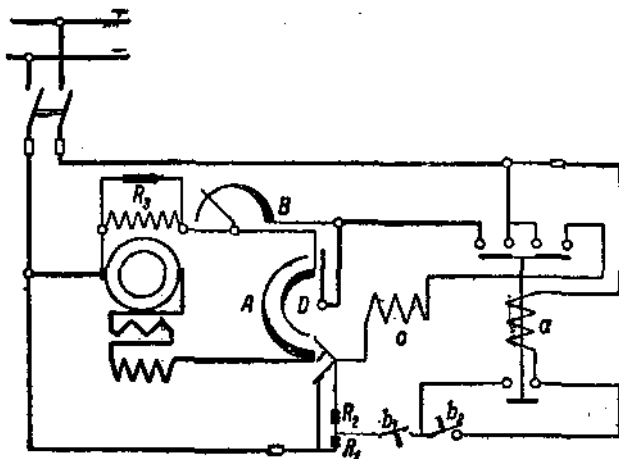
Два параллельно присоединенных шунтовых реостата B и D установлены с тою



Фиг. 400.



Фиг. 401.

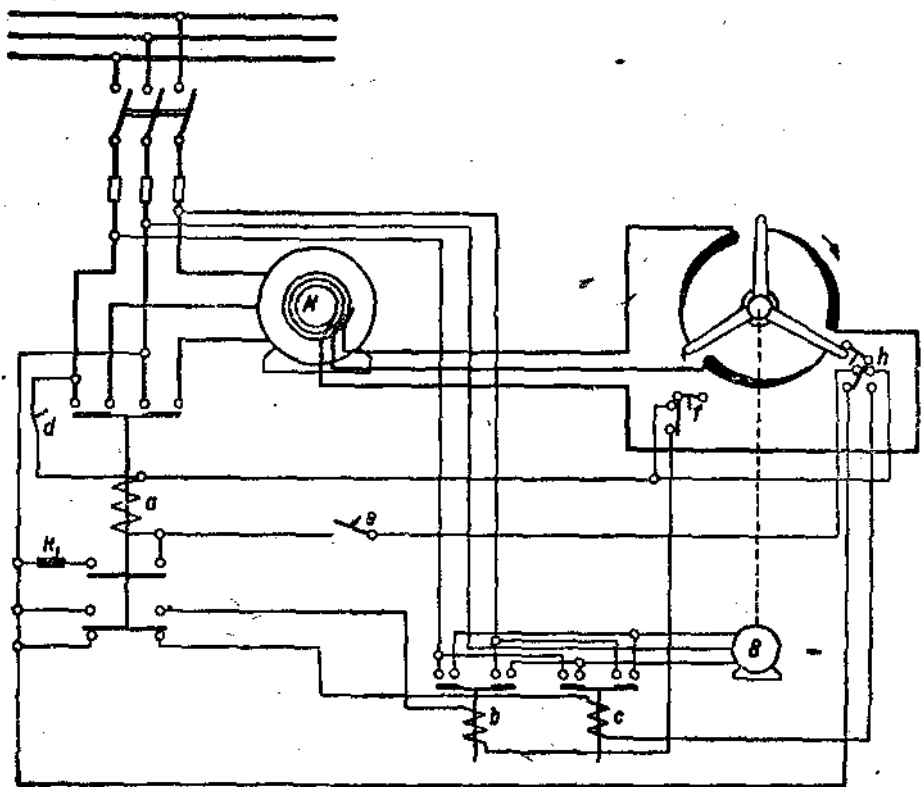


Фиг. 402.

целью, чтобы после пуска автоматически достичь того же числа оборотов двигателя, которое было до остановки, что особенно важно в условиях работы на металлостанках, где часто приходится делать промеры детали с остановкой станка.

Сопротивление R_s , шунтирующее обмотку возбуждения двигателя, служит для предотвращения загорания контактов от экстратокков размыкания.

Используя вспомогательный двигатель B (фиг. 403), связанный передачей с рукояткой пускового сопротивления, можно чрезвычайно просто и удобно разрешить вопрос автоматического пуска и остановки главного приводного



Фиг. 403.

двигателя. При этом его можно пустить лишь в том случае, если рукоятка реостата находится в начальном пусковом положении.

После остановки двигателя рукоятка реостата автоматически переходит в начальное положение. Переключатель h , находящийся под действием пружины, блокирует реле a так, что пуск возможен лишь в том случае, если реостат находится в начальном положении. Пуск производится с помощью кнопки e . Реле a замыкает цепь главного двигателя и одновременно включает реле b , которое замыкает цепь вспомогательного моторчика B , вращающего рукоятку реостата.

По окончании пуска рукоятка реостата разомкнет через посредство выключателя f цепь реле b , и моторчик остановится.

При выключении цепи реле *a* работает реле *c* и включает моторчик *B* на обратный ход, т. е. на введение пускового реостата.

В конце этого процесса рукоятка реостата разомкнет цепь реле *c* и замкнет другие контакты, подготовив установку для следующего пуска.

4) На фиг. 404 приведена схема автоматического регулирования числа оборотов двигателя постоянного тока. Это достигается с помощью кнопочного управления особым вспомогательным моторчиком *B*, последний с рукояткой регулировочного реостата. Если желательно увеличить число оборотов главного двигателя *M*, то нажимают кнопку *a*, замыкающую цепь реле *b*, которая в свою очередь замыкает цепь моторчика *B*, последний будет вращаться, включая в цепь шунта сопротивление и увеличивая тем самым число оборотов двигателя *M* до тех пор, пока нажата кнопка *a*.

Для уменьшения скорости нажимается кнопка *c*, и моторчик *B* вращается в другую сторону, выключая сопротивление из цепи возбуждения двигателя и уменьшая скорость главного двигателя *M*.

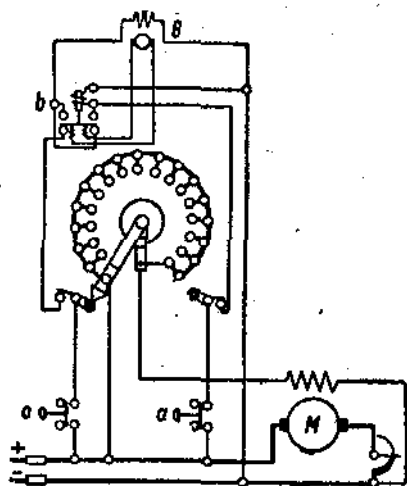
Как пример автоматического управления станком с поступательно-возвратным движением, на фиг. 405 приведена электрическая схема управления продольнострогального станка фирмы AEG.

Двигатель *M* обладает шунтовой и компаундной обмотками, а также и дополнительными полюсами.

Управление осуществляется с помощью барабана и механически с ним связанного пускового реостата *A*, представляющего ряд контактов, прижимаемых пружинами к неподвижным контактам, электрически соединенным с отдельными секциями реостата.

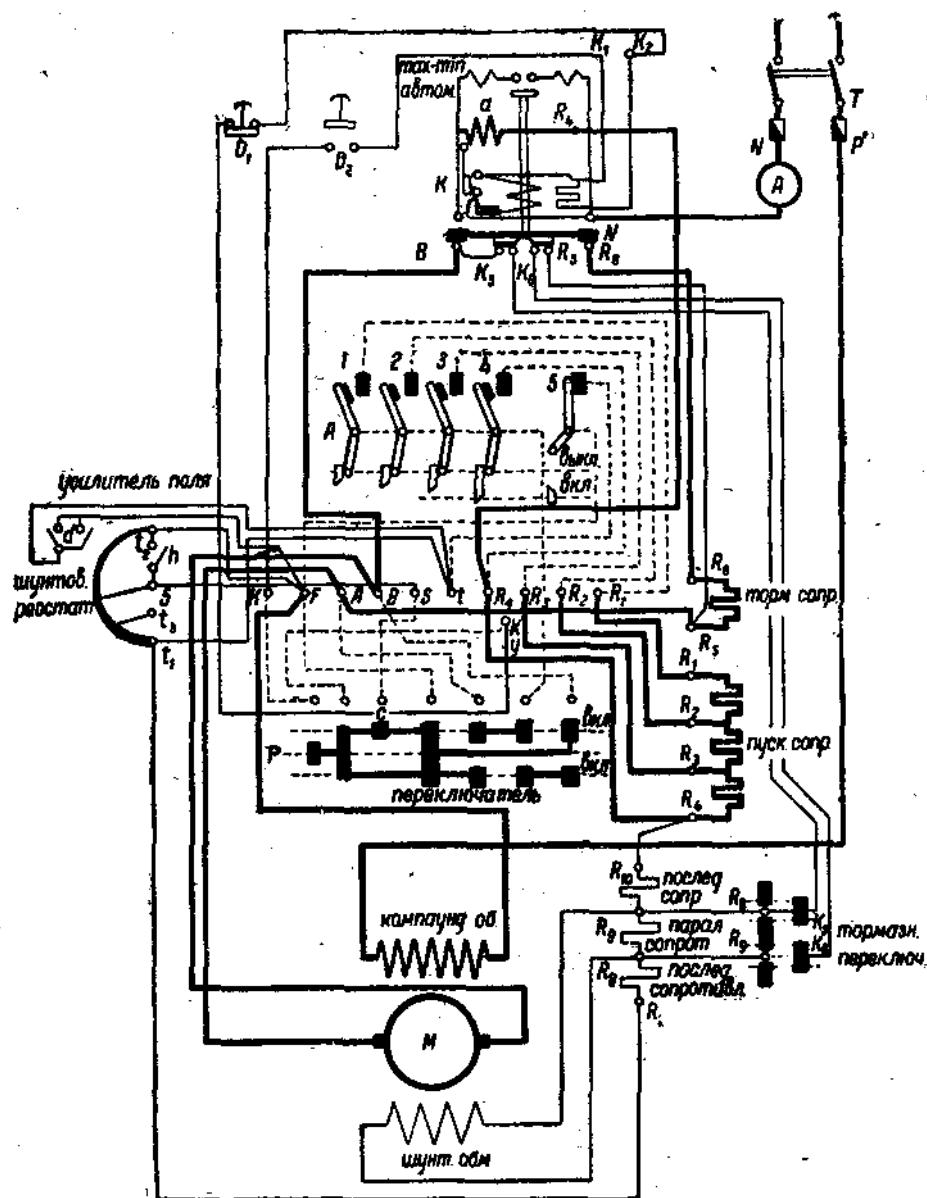
В момент пуска контакты реостата *A* отжаты кулачками вала, поворачиваемого перед пуском штангой, соединяющей переключательный барабан *P* и кулачковый вал пускового механизма, а во время пуска, в силу наличия прореза в штанге, кулачковый вал поворачивается в обратную сторону под действием пружины. Воздушным катарактом это движение замедляется, чем и осуществляется последовательность выключения секций реостата. На кулачковом валу, как видно из схемы, имеется еще дополнительный кулачок, который заставляет замыкать контакты, шунтирующие обмотку возбуждения на время пуска.

Переключательный барабан *P* несет на себе 7 ламелей для главного тока и 3 (левые) для вспомогательного, из коих крайняя левая служит для блокировки устройства, а именно она позволяет запустить привод только в том случае, если переключательный валик *P*, а вместе с ним и кулачковый вал *A* пускового реостата находятся в соответствующем положении. Вторая слева ламель, предназначенная для питания нулевой катушки автомата, является в то же время и ограничителем хода стола станка, ибо она сделана несколько короче других ламелей, так что в случае перехода столом определенного положения нулевая катушка оказывается без тока, и привод



Фиг. 404.

останавливается под действием динамического торможения двигателя, якорь которого замыкается на сопротивление $R_6 R_8$.

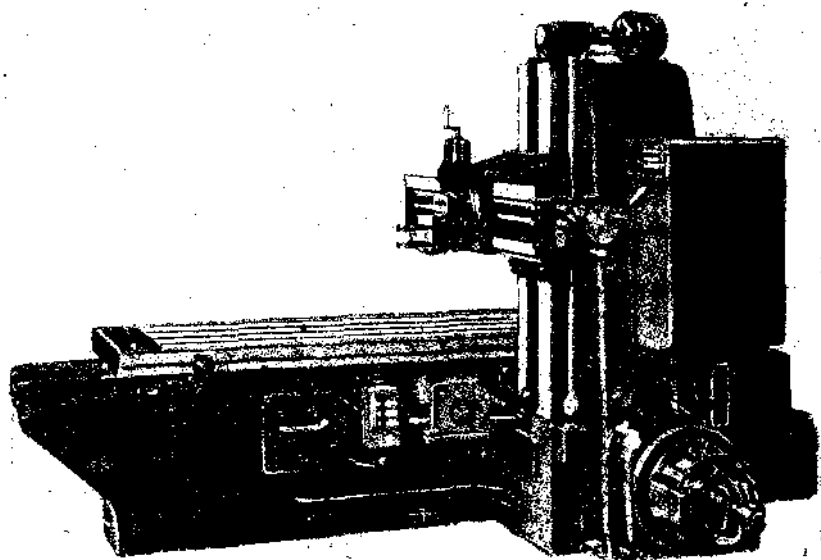


Фиг. 405.

Для пуска в ход станка требуется включить главный рубильник T , перевести барабан P в среднее положение и нажать кнопку D_2 , в силу чего автомат включит сеть, и контакты барабана P окажутся под током. После

этого необходимо от руки повернуть в ту или другую сторону барабан P в зависимости от желаемого направления движения стола. Двигатель придет в действие, и в дальнейшем станок управляется уже автоматически через посредство укрепленных на столе кулачков, воздействующих на мотылеобразный рычаг, связанный с барабаном P и пусковым реостатом A .

При рабочем ходе цепь двигателя следующая: $(+)$, компаундная обмотка двигателя, контакт F , барабан P , контакт B , якорь двигателя, контакт A , барабан P , пусковой реостат, постепенно выключающийся по мере разгона двигателя, катушка автомата и $(-)$.



Фиг. 406.

Шунтовая обмотка двигателя питается в это время следующим образом: $(+)$, контакт с барабаном P , сопротивление шунтового реостата t_1 , сопротивление $R_8 - R_7$, обмотка возбуждения, сопротивление $R_9 - R_{10}$, R_4 и $(-)$.

Перед реверсом замыкается накоротко шунтовой реостат с помощью так называемых усилителей поля возбуждения, которые приводятся в действие от особых рычагов, укрепленных на столе станка. В силу этого противоэлектродвижущая сила двигателя оказывается больше приложенного напряжения, и двигатель начинает рекуперировать энергию. Рекуперация продолжается примерно до момента достижения двигателем своего основного числа оборотов.

После этого наступает самоторможение привода, причем перед концом хода стола упор последнего поворачивает кулачковый вал пускового реостата, и к моменту переключения тока барабаном P в цепь двигателя оказывается включенным все пусковое сопротивление.

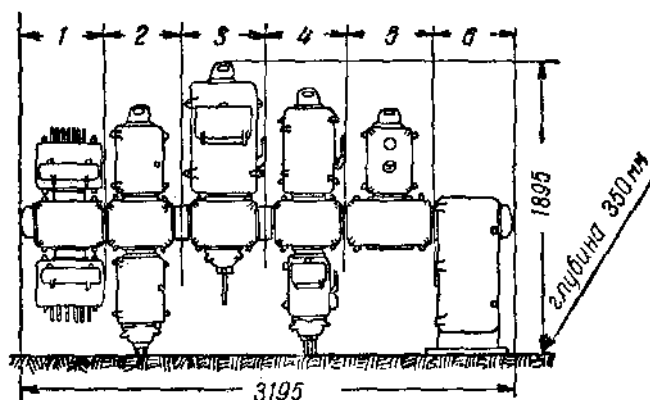
Затем начинается разгон в обратном направлении. Обратный ход стола обычно производится с максимальной скоростью, для чего в цепь возбуждения двигателя включается весь шунтовой реостат. На время разгона

последний зашунтирован контактом 5 пускового реостата. По желанию можно скорость обратного хода сделать равной скорости рабочего хода, для чего необходимо замкнуть рубильник h , и тогда по обмотке возбуждения, как при рабочем, так и при обратном ходе, будет протекать один и тот же ток, ограниченный лишь сопротивлением (от контакта t_1 до ручки реостата).

Для остановки привода достаточно нажать кнопку D_1 , которой размыкается цепь катушки реле, и автомат разъединит все устройство от сети. При этом двигатель тормозится замыканием цепи якоря на сопротивление $R_5—R_6$. Обмотка возбуждения при этом питается от самого двигателя, являющегося в данном случае генератором, для чего необходим добавочный переключатель (тормозной по схеме), поддерживающий направление тока в цепи возбуждения при каждом изменении направления вращения двигателя. При пониженном напряжении и при перегрузке остановка привода может осуществиться с помощью максимально-минимального автомата.

На фиг. 406 представлен общий вид электрического привода строгального станка фирмы АЕГ; см. также далее фиг. 474—476.

Из автоматической пусковой аппаратуры изготовления ВЭО, кроме вышеуказанной для пуска синхронных двигателей, можно назвать еще „магнитные“ пускатели завода ХЭМЗ, подробно описан-



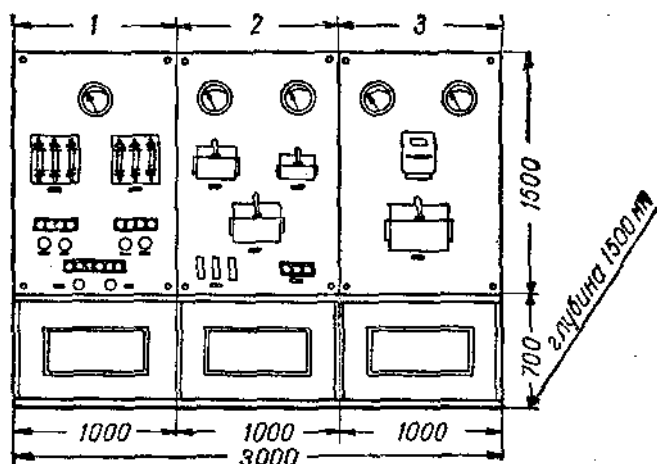
Фиг. 407.

ные в сборнике ЛОВЭО (листы № А 221—224, представляющие выкопировку с чертежей ХЭМЗ). Аппаратура эта позволяет осуществить пуск и реверс короткозамкнутых двигателей нажатием кнопки.

Аппаратуры для автоматического „реостатного“ пуска и тем более для кнопочного регулирования скорости заводы ВЭО еще не изготавливают.

В заключение следует лишь сказать несколько слов о так называемых „моторных ящиках“, которые начинают вытеснять мраморные „открытые“ щитки не только в индивидуальных моторных установках, но даже в групповых распределительных устройствах промышленных предприятий. Из фиг. 407 и 408 видно; насколько

распределительное устройство из чугунных закрытых ящиков занимает меньше места, чем открытый мраморный щит (около 2 м³ вместо 10 м³). Разница (в 5 раз) объясняется меньшей высотой, а главным образом меньшей глубиной (350 мм вместо 1500 мм).



Фиг. 408.

В табл. 114 приведено сравнение стоимости чугунных пусковых ящиков и мраморных щитков для электродвигателей на силу тока в 25 А, 60 А и 100 А.

ТАБЛИЦА 114.

Чугунный пусковой ящик			Открытый мраморный щиток для пуска		
Сила тока	Стоимость		Сила тока	Стоимость	
	Руб.	Коп.		Руб.	Коп.
25 А (ЩА 25)	94	25	25 А . . .	82	90
60 А (ЩА 60)	120	30	60 А . . .	96	20
100 А	180	70	100 А . . .	112	71

Впрочем, выбор типа, а в особенности числа и местоположения групповых щитков определяющего конфигурацию и сечения сети выходит за пределы настоящего курса электроприводов, согласно данному выше, а также на следующей странице, определению понятия „электропривод“.

Как уже сказано, графики нагрузки, определение типа, числа и расположения подстанций, канализация энергии, способы прокладки, защита двигателей и т. п. отнесены к смежному курсу „электроснабжения предприятий“.

ГЛАВА VIII.

ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА.

§ 1. Общие основания.

В общей цепи силового хозяйства фабрично-заводских предприятий (электрическая станция — сеть — электродвигатель — передачи — станок) электрический привод охватывает три последние звена и, следовательно, связывает двигатель с машиной — орудием и определяет их взаимоотношения.

Таким образом под понятием электрический привод будет подразумеваться не только комбинация механических передач, но и соотношение между двигателем и станком, будет ли это обслуживание одним двигателем нескольких станков (групповой привод), или обратно — одного станка одним или несколькими двигателями (одиночный или многомоторный привод).

Электрический привод играет гораздо большую роль в общей экономике предприятия, чем до сих пор по трафарету ему отводят, в силу того факта, что, подходя вплотную к станку и даже заключая его в себе, он оказывается тесно связанным с самим производственным процессом. Влияние на последний правильного выбора привода, как в количественном, так и в качественном отношении, начинает выявляться во всей полноте только последними опытами, поставленными на Западе над станками, в которых все три звена представляют одно нераздельное целое и строятся комплектно, подобно электронасосам и электроventилиаторам, электролебедкам, электросверлам, турбогенераторам и т. п.

Такое комбинированное машиностроение, освобождая станок от всякой связи с трансмиссией, делает его компактным, легко доступным со всех сторон, переносным, независимым от других станков в смысле рациональной установки по ходу технологического процесса, а, главное, легко управляемым в пуске, реверсировании и регулировке.

В дальнейшем вернемся к выяснению влияния механических свойств двигателя на управление станком и, следовательно, живого участия электродвигателя в рабочем процессе.

Забегая вперед, отметим только, что электрическая регулировка, дающая возможность работать по предписываемой и наиболее выгоднейшей скорости в каждый данный момент и, следовательно, максимально использовать станок, может быть достигнута, во-первых, только при определенном роде привода — одиночном, а во-вторых, при выборе определенного рода двигателя — с широкой регулировкой.

Таким образом само машиностроение не только предreshает в известных случаях выбор привода и выбор двигателя, но даже

связывает в общую задачу решение вопроса о выборе дальнейших звеньев силового хозяйства — генерирования и передачи электрической энергии.

Здесь весьма уместно будет подчеркнуть эту тесную взаимную связь отдельных звеньев силового хозяйства фабрично-заводских предприятий и установить, что единственной общей базой для определения всех их должно быть принято замыкающее звено, т. е. самый производственный процесс обработки материалов.

Именно на этой базе и должно быть поставлено не только конструирование станков, но и проектировка всего силового потока от генераторной станции до обрабатывающего инструмента, а также самых зданий и их взаимного расположения, при учете правильного хода предмета обработки по всему производству.

Если обратиться с изложенной точки зрения к истории развития электрического привода, насчитывающей всего 35—45 лет, и проглядеть полемику между сторонниками одиночного и группового электропривода, особенно разгоревшуюся в Америке и Германии в 1908—1910 гг., т. е. примерно 20 лет тому назад, когда американцы во главе с Тейлором называли одиночный привод необоснованной роскошью, то становится понятным, что основанием для сравнения являлся, главным образом, механический к. п. д. Тем длинным перечнем преимуществ одиночного привода, который приводился его сторонниками, роль его все же не дооценивалась.

Промышленность военного времени, подняв требования к производству до неслыханных ранее цифр производительности станка (в металлообработке — параллельно с применением для инструментов особых сортов стали, допускающих большие скорости резания), дала толчок построению станков на новых основаниях максимальной производительности и компактности, выдвигаемых научной организацией производства.

Новое машиностроение пробудило в кругу электротехников живой интерес к постановке конкретных опытов по использованию ценных механических свойств двигателя в управлении станком, в результате которых мы имеем целый ряд разработанных схем автоматического или крайне упрощенного „кнопочного“ управления работой непосредственно с места рабочего у станка.

Ярким доказательством реальных достижений этих опытов является так называемый „многомоторный“ одиночный привод, в котором сложные движения в станке дифференцированы и распределены между отдельными двигателями, число которых на одном станке достигает десятков и сотен. При этом вопросы конструирования станка и самого электродвигателя оказались настолько неразрывно связанными, что некоторые электротехнические и даже машиностроительные фирмы объединили у себя разработку тех и других, следствием чего явилась возможность ввести в практику целый ряд таких машин-орудий, в которых приводной двигатель является составной и наиболее существенной частью всего привода. Примером подобного разрешения вопросов являются, например, токарные станки с двигателем на шпинделе (Spindelstockmotor), шлифовальные станки машиностроительной фирмы F. Schmaltz, в которых круг наложен на короткозамкнутый ротор, вращающийся вокруг статора, а не внутри последнего. Идея применения отдельных миниатюрных

двигателей на каждой шпуле пенькопрядильной машины, вызывавшая недоумение 7—10 лет назад, уже получила практическое осуществление.

Таким образом можно прийти к заключению, что в настоящее время групповой электрический привод уже пережил эпоху своего наибольшего распространения и, сыграв в истории развития электрического привода большую роль переходной стадии от механического привода к электрическому, может претендовать на сравнение с одиночным электроприводом лишь в крайне ограниченных областях промышленности, особенно при проектировании оборудования заново.

Совершенно иная постановка проектирования должна быть при переоборудовании существующего механического привода на электрический, представляющем в наших условиях обширнейшее поле деятельности для электриков. Здесь к вопросу сравнения надо подходить особенно осторожно, всесторонне взвешивая все положительные и отрицательные стороны того и другого привода.

§ 2. Системы привода и их отдача.

Выяснив основание для проектирования привода, перейдем теперь к разбору возможных систем последнего и тех механических передач, из которых тот и другой привод составляются.

В самом вступлении к курсу было указано, что задача выбора привода является чисто электротехнической, причем инженеру, электрифицирующему фабрику или завод, приходится установить:

I. Систему электрификации с выбором типа электрического привода и механических передач.

II. Род и тип электродвигателей с точки зрения их механических свойств.

III. Систему снабжения электроэнергией (выбор тока и напряжения).

Итак, переходя к приводу, будем различать: а) старейший — групповой привод, б) одиночный привод, в) смешанную систему привода из двух предыдущих, г) индивидуальный привод.

Прежнее механическое распределение энергии в виде сложнейших трансмиссий, работающих от одного первичного двигателя, разбитое по этажам и помещениям на отдельные группы станков, по возможности однотипных, работающих в одинаковых условиях („с малым простоем“) от своих небольших трансмиссионных валов и электродвигателей (большею частью группы мелких станков массового производства), представляет собою нынешний вид группового электрического привода.

Всякое оборудование станка или его элемента отдельным, исключительно его обслуживающим, двигателем или даже несколькими, является одиночным электрическим приводом (одномоторным или многомоторным).

Наконец, встречающийся за последнее время термин „индивидуальный привод“ будем понимать как комплекс машины с таким двигателем, который сконструирован совершенно индивидуально для нее и иногда составляет часть ее, как, например, шлифовальные круги фирмы Шмальц (фиг. 285).

Здесь нельзя не указать еще на одну разновидность электропривода, которой, может быть, предстоит большое распространение, а именно на такую электрификацию движения отдельных элементов производственных механизмов, переходной ступенью, к которым являются современные „электрические машины-орудия“, в виде электрических роллангов (где роликами, передвигающимися материал, служат внешние роторы электродвигателей) или шлифных станочков типа, указанного на фиг. 285. В настоящее время ряд сотрудников автора по кафедре работает над осуществлением вращательного и поступательного движения элементов машин-орудий помощью перенесения вращающегося или поступательно движущегося магнитного поля непосредственно к этим элементам, в виде ли „дугового“ статора в электрической кард-машине инж. Фридкина или модели „развернутого“ статора инж. Розенберга. Если испытания последней в лаборатории электроприводов Электротехнического института им. Ленина еще и не дают практических результатов, то не следует забывать, что всего семь лет назад, при составлении первого издания настоящего труда, автор лишь вскользь указал на тенденцию к переходу на многомоторный привод машин в виде электрификации пенькопрядильной машины по системе Шнейдера, тогда как эти машины ныне уже работают практически в Ленинграде, а многомоторный привод во всех отраслях промышленности является, пожалуй, более типичным, чем трансмиссионный, ревностно отстаиваемый лишь в технически отсталых странах и являющийся тормозом в современном станкостроении. Скорость производственных процессов так быстро растет, что всякие „понижительные“ промежуточные передачи между рабочим валом и валом двигателя являются во многих случаях не только лишними, но электродвигатель явно начинает отставать. Скорость вращения веретен порядка 8000 об/мин, деревообрабатывающих фрезов порядка 9000 об/мин, центрофуг для вискозы порядка 12000 об/мин еще осуществляется непосредственно электродвигателями, но та скорость шлифовальных дисков, о которой идет речь в современной металлообработке — порядка 30 000 об/мин и выше, должна явиться задачей для конструктора „электродвигателя завтрашнего дня“.

Разбор и сравнение приводов будем вести сначала с точки зрения их экономичности в отношении расхода электрической энергии, т. е. их механического к. п. д., а затем уже обратимся к выяснению технических требований, которые производство предъявляет к приводу и к сравнению различных его систем с точки зрения технической целесообразности и приспособленности к условиям производства.

Для того чтобы возможно шире охватить все факторы, влияющие на к. п. д. привода, прибегнем к несколько искусственному сравнению приводов и для облегчения примем станки одинаковыми. *) Кроме того сделаем допущение, что в одиночном приводе применяются двигатели постоянного тока, а в групповом приводе — переменного тока.

*) H. Neuenkirchen, Die wirtschaftlichkeit-sekundärer Elektrisierung der Mech. Werkstätten, 1925.

Это допущение с точки зрения расхода энергии несомненно даст преимущество трансмиссионному приводу, так как для одиночного привода в таком случае обычно необходим умформер.

Итак, к. п. д. одиночного привода группы станков будет:

$$\eta_{gr. ez} = \eta_{W ez} \cdot \eta_{M ez} \cdot \eta_N \cdot \eta_a, \quad (302)$$

где

$\eta_{gr. ez}$ — к. п. д. одиночного привода группы станков,

$\eta_{W ez}$ — к. п. д. станка для одиночного привода,

$\eta_{M ez}$ — к. п. д. двигателя,

η_N — к. п. д. распределительной сети. (Последний коэффициент введен с целью учесть увеличенные против группового привода потери в распределительной сети.)

η_a — к. п. д. умформера.

Для определения к. п. д. трансмиссионного привода, очевидно, необходимо взять отношение полезно расходуемой энергии за определенный промежуток времени к энергии из сети. С учетом коэффициентов загрузки и включения станков общий к. п. д. трансмиссионного привода для группы станков будет равен:

$$\eta_{gr. tr} = \frac{P \cdot \eta_b \cdot m \cdot \varepsilon \cdot t_s}{\frac{P \cdot \eta_b \cdot m \cdot \varepsilon \cdot t_s}{\eta_{W tr} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{M tr}} + \frac{W_{tr} (1 - \varepsilon) \cdot t_s}{\eta'_{M tr}}}, \quad (303)$$

где

P — номинальная мощность на шпинделе станка (кВт);

η_b — коэффициент загрузки станка =

$$= \frac{\text{мощность на шпинделе в данный момент}}{\text{номинальная мощность станка на шпинделе}};$$

m — число станков в группе;

ε — средний коэффициент включения станков = $\frac{t_o}{t_o + t_s} = \frac{t_a}{t_s}$;

t_s — продолжительность смены или того отрезка времени, за который желают определить $\eta_{gr. tr}$;

$\eta_{W tr}$ — к. п. д. станка для трансмиссионного привода ($\eta_{W tr}$ может значительно отличаться от $\eta_{W ez}$, см. табл. 116);

η_{tr} — к. п. д. трансмиссии;

$\eta_{M tr}$ — к. п. д. трансмиссионного двигателя при данной нагрузке;

$\eta'_{M tr}$ — к. п. д. трансмиссионного двигателя при холостом ходе трансмиссии;

W_{tr} — потери холостого хода трансмиссии.

Приведенная формула (303) к. п. д. трансмиссионного привода является приближенной, так как в действительности, конечно, холостого хода трансмиссии при сколько-нибудь значительном числе станков обычно не наблюдается. Но, имея в виду, что в указанную формулу введен средний коэффициент включения станков ε , кото-

рый почти никогда не равен единице, мы должны допустить, что будто бы имеются промежутки времени, равные $(1 - \varepsilon) \cdot t_s$, когда трансмиссия вращается вхолостую. Подставим в формулу (303) вместо потерь W_{tr} их значение, равное

$$W_{tr} = \left(\frac{\eta_b \cdot P \cdot m}{\eta_{wtr} \cdot \eta_{tr}} - \frac{\eta_b \cdot P \cdot m}{\eta_{wtr}} \right) \cdot \beta, \quad (304)$$

где β — коэффициент, меньший единицы, учитывающий уменьшение потерь в трансмиссии при холостом ходе против потерь при нагрузке.

В таком случае

$$\eta_{gr, tr} = \eta_w \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{Mtr} \frac{\eta'_{Mtr} \cdot \varepsilon}{\eta'_{Mtr} \cdot \varepsilon + (1 - \varepsilon)(1 - \eta_{tr}) \cdot \eta_{Mtr} \cdot \beta} \quad (305)$$

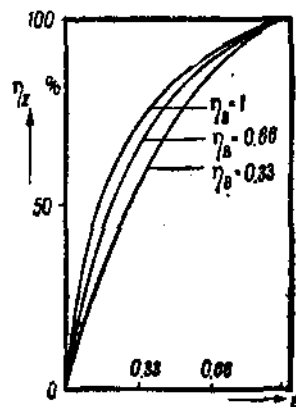
или

$$\eta_{gr, tr} = \eta_w \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{Mtr} \cdot \eta_z, \quad (305')$$

где

$$\eta_z = \frac{\eta'_{Mtr} \cdot \varepsilon}{\eta'_{Mtr} \cdot \varepsilon + (1 - \varepsilon)(1 - \eta_{tr}) \eta_{Mtr} \cdot \beta}. \quad (306)$$

Значение коэффициента η_z и характер изменения его видны из фиг. 409. Зависимость этого коэффициента от η_b понятна, ибо η_{Mtr} зависит от загрузки станков. При этом к. п. д. трансмиссии определялся по известным формулам Schönwald'a. *) Значения указанных коэффициентов для трансмиссий с различным числом станков m и различной мощностью последних P приведены в табл. 115.



Фиг. 409.

ТАБЛИЦА 115.

P kW	$m = 2$	$m = 20$	$m = 40$	$m = 80$
0,1	0,68	0,72	0,71	0,66
1,0	0,87	0,85	0,83	0,83
2,0	0,90	0,86	0,84	0,82
4,0	0,91	0,88	0,85	0,80

ТАБЛИЦА 116.

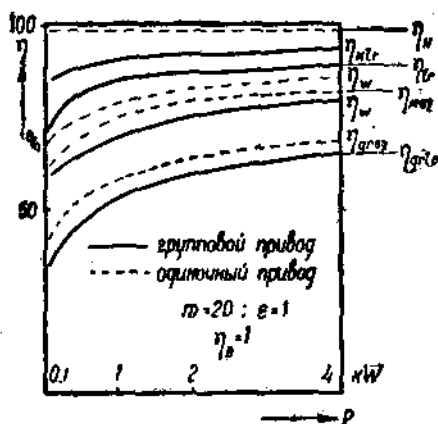
P kW	η_{wtr}	η_{wez}
0,1	0,60	0,69
1,0	0,70	0,79
2,0	0,75	0,83
4,0	0,79	0,85

К. п. д. станков для одиночного и группового привода, определенные по данным опытов проф. Schlesinger'a, Kurrein'a и Meller'a, указаны в табл. 116.

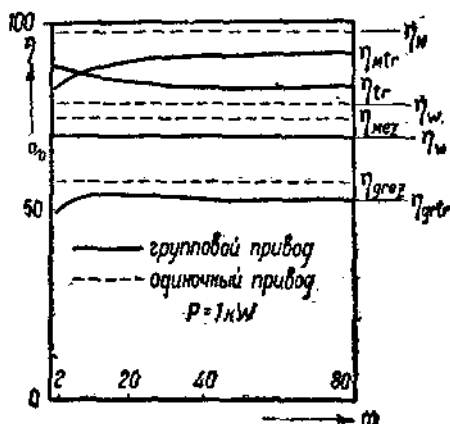
Геометрическая интерпретация формул (302) и (305)

*) „Der Betrieb“, 1920/21 стр. 371.

для случая работы трансмиссионного привода с 20 станками при $\epsilon = 1$ и $\eta_b = 1$ приведена на фиг. 410, причем по оси абсцисс отложена номинальная мощность станка P_{kW} . Кроме общего к. п. д. одиночного и группового привода, на фиг. 410 нанесены и кривые составляющих

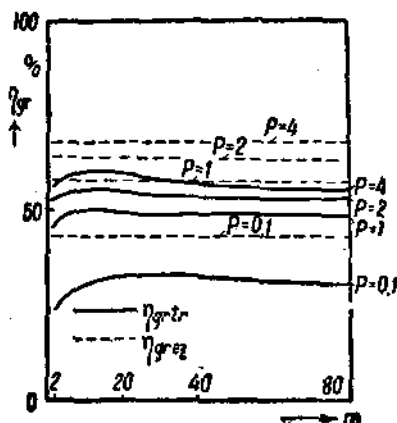


Фиг. 410.

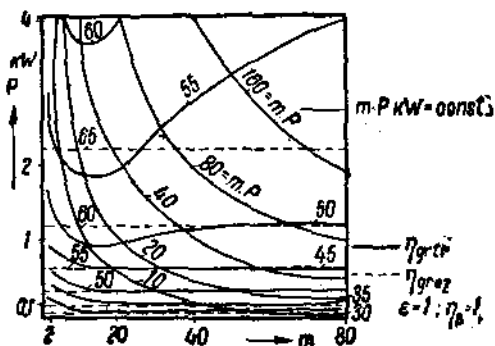


Фиг. 411.

к. п. д. $\eta_{gr\ tr}$, $\eta_{M\ tr}$, $\eta_{M\ ez}$ и $\eta_{w\ tr}$. Сплошные линии относятся к групповому приводу, пунктирные — к одиночному, что справедливо и по отношению к дальнейшим чертежам этого параграфа. Как видно из фиг. 410, результирующие кривые $\eta_{gr\ tr}$ и $\eta_{gr\ ez}$ идут почти параллельно, differing друг от друга всего лишь на несколько процентов.



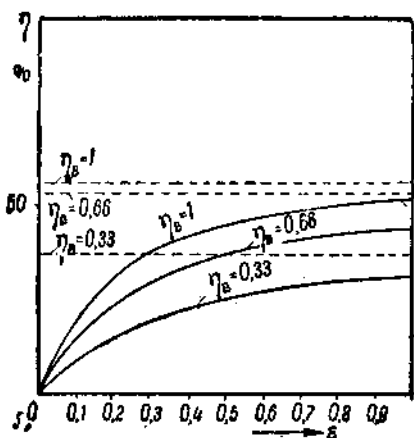
Фиг. 412.



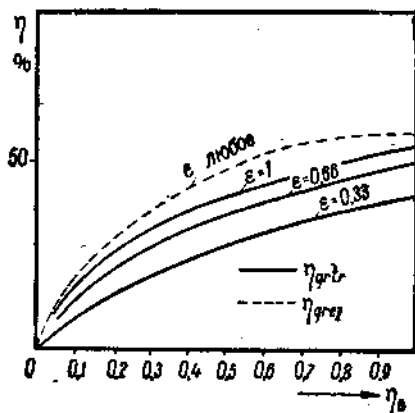
Фиг. 413.

Для того же режима работы, т. е. при $\epsilon = 1$ и $\eta_b = 1$, но для станков мощностью в 1 kW, на фиг. 411 вычерчена зависимость общего к. п. д. одиночного и группового привода от числа станков в группе m . Величина к. п. д. группового привода имеет неко-

торый максимум в пределах групп 16—25 станков, причем этот максимум, как видно из фиг. 412, смещается в сторону большего числа станков в группе при малых номинальных мощностях станка. Наличие этого максимума объясняется тем, что, с одной



Фиг. 414 а.

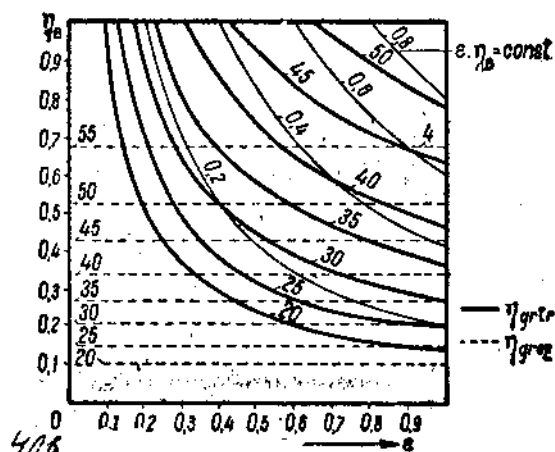


Фиг. 414 б.

стороны, при увеличении числа станков η_{gr} увеличивается, а с другой стороны, при этом уменьшается η_{tr} .

На фиг. 413 нанесены кривые равных к. п. д. для того и другого привода при режиме работы $\varepsilon = 1$ и $\eta_b = 1$. При небольших мощностях станков число станков m мало отражается на величине к. п. д. группового привода, и, наоборот, при мощностях станков от 1,5 до 4 kW его влияние очень значительно. Коэффициент полезного действия одиночного привода, конечно, не зависит от числа станков (m), что и выражено горизонтальными линиями. На этой же фигуре нанесены кривые $m \cdot P = \text{const}$, которые подтверждают общеизвестный факт, что выгоднее иметь групповой привод с малым числом станков большой мощности и с большим числом станков малой мощности.

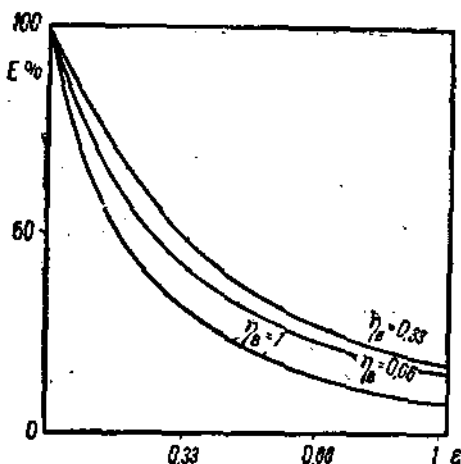
Для выяснения влияния коэффициента включения ε и коэффициента загрузки станка η_b на к. п. д. привода на фиг. 414 а и



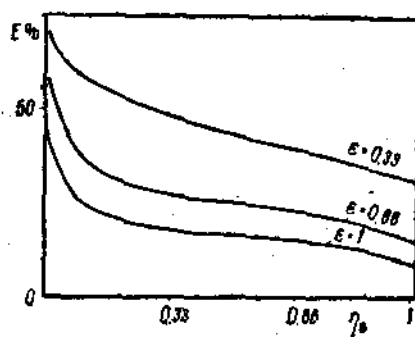
Фиг. 415.

414b приведены соответствующие кривые, указывающие, во-первых, что к. п. д. одиночного привода не зависит от ε ; во-вторых, что к. п. д. трансмиссионного привода с уменьшением ε падает вначале незначительно, а затем очень круто; в-третьих, что с уменьшением загрузки станка (η_b) к. п. д. одиночного привода падает сначала медленно и затем быстро, а к. п. д. группового привода падает сразу быстро.

На фиг. 415 нанесены кривые равных к. п. д. и кривые постоянных значений $\varepsilon \cdot \eta_b = \text{const}$. Анализ этих кривых указывает, что при одинаковых значениях произведения коэффициентов „режима работы“ малый коэффициент включения ε и большой коэффициент



Фиг. 416 а.



Фиг. 416 б.

загрузки η_b выгоднее, чем наоборот, в особенности, конечно, для одиночного привода.

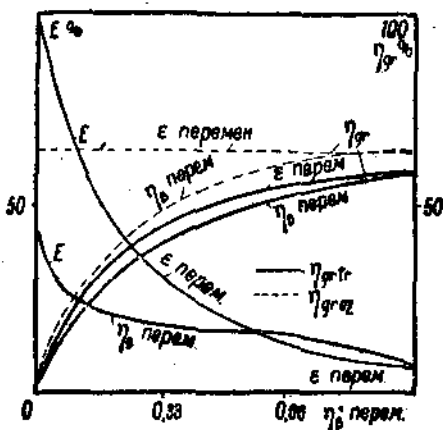
Теперь перейдем к вопросу об экономии энергии, получающейся от применения одиночного привода (в процентах):

$$E = \left(1 - \frac{\eta_{gr. tr}}{\eta_{gr. ex}}\right) \cdot 100. \quad (307)$$

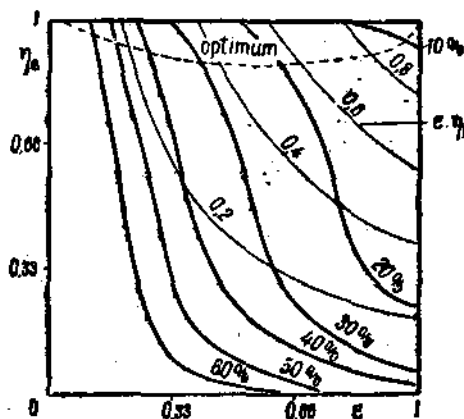
На фиг. 416 а и 416 б представлена зависимость E от ε и η_b ; на фиг. 417 кривая $E = f(\eta_b)$ имеет двойной перегиб, т. е. при больших значениях η_b E растет быстро, затем рост этот замедляется и снова усиливается лишь при малых η_b , в то время как кривая $E = f(\varepsilon)$ непрерывно растет с уменьшением ε . Обе кривые пересекаются примерно около $\eta_b = 0,6$, $\varepsilon = 0,6$. Это означает, что при больших значениях η_b и ε коэффициент загрузки η_b больше влияет на E , чем ε , и, наоборот, при малых значениях η_b и ε преимущественное влияние переходит к коэффициенту включения ε . То же самое можно видеть из фиг. 418, на которой нанесены кривые $\varepsilon \cdot \eta_b = \text{const}$ и кривые равных значений E .

Влияние числа станков m в группе и мощности их P отражается в меньшей мере на экономии в расходе энергии, чем влия-

ние η_b и ϵ , но все-таки оно заметно, как это видно на фиг. 419 и 420. Особенно важно отметить тот факт, что большая экономия от введения одиночного привода получается при малых номиналь-

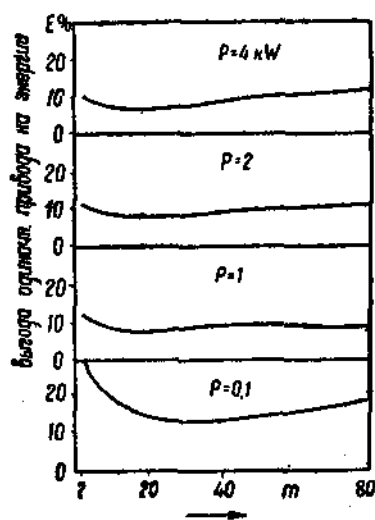


Фиг. 417.

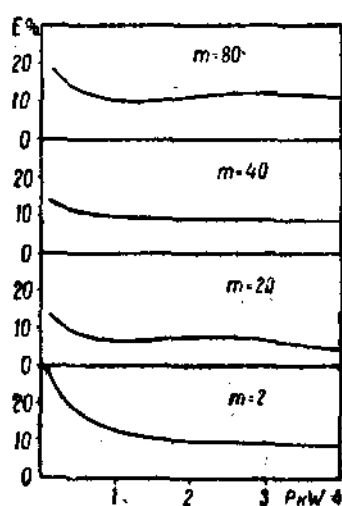


Фиг. 418.

ных мощностях станков, что противоречит установившемуся взгляду, будто одиночный привод выгоден в применении только к станкам большой мощности.



Фиг. 419.



Фиг. 420.

Резюмируя вышеизложенное о сравнении группового и одиночного привода с точки зрения расхода энергии, можно сказать, что:

- 1) превосходство современного одиночного привода в отношении расхода энергии в значительной степени обуславливается лучшим к. п. д. самих станков;

2) к. п. д. группы станков при одиночном приводе, само собой разумеется, не зависит от числа станков в группе, в то время как к. п. д. трансмиссионного привода имеет максимум при определенном числе станков;

3) к. п. д. одиночного привода не зависит от коэффициента включения ε , а к. п. д. группового привода с уменьшением ε падает вначале незначительно, а потом быстро;

4) к. п. д. одиночного привода падает с уменьшением η_b вначале медленно, а затем быстро; к. п. д. группового привода сразу быстро;

5) при одинаковых значениях произведения коэффициентов „режима работы“ ($\varepsilon \cdot \eta_b = \text{const}$) для обоих родов привода малый коэффициент включения ε и большой коэффициент загрузки η_b лучше, чем обратно;

6) экономия в расходе энергии E в процентах при одиночном приводе по сравнению с групповым имеет ясно выраженный минимум при определенном числе станков m , изменяющемся с номинальной мощностью станков;

7) экономия в расходе энергии E в процентах при одиночном приводе по сравнению с групповым имеет слабо выраженный минимум в определенных пределах мощности;

8) максимум экономии E в процентах наблюдается при наименьшем и наибольшем значениях P и m ;

9) экономия E в процентах растет с уменьшением коэффициента включения ε ;

10) экономия E в процентах растет с уменьшением загрузки η_b , причем этот рост особенно значителен при больших и малых значениях η_b ;

11) при одинаковых значениях произведения коэффициентов режима работы ($\varepsilon \cdot \eta_b = \text{const}$) вначале на увеличение E большее влияние оказывает изменение η_b , а затем начинает превалировать влияние величины ε ;

12) максимум E достигается при уменьшении ε , если одновременно уменьшается и η_b до наименьшей своей величины.

Практически вопрос экономического сравнения приводов не ограничивается только учетом стоимости израсходованной энергии, но решается составлением нескольких вариантов оборудования и подсчетом всех прямых и косвенных расходов. Для этого необходимо составление эскизов того и другого привода.

Здесь прежде всего мы сталкиваемся с механическими передачами, которые известны из прикладной механики. Тем не менее пройти совершенно мимо них было бы неправильно, так как обзор будет производиться в данном случае не с точки зрения расчета, а выбора, т. е. в отношении механических свойств, как, например, передаточных коэффициентов и *) (*Übersetzungsverhältnis*), к. п. д., компактности, эластичности и, следовательно, применимости их при том или другом роде привода.

В виду резких колебаний значения этих коэффициентов в зависимости от местных условий будут даны средние, приблизительные значения, что вполне достаточно для сравнительных подсчетов.

*) См. примечание на стр. 259.

§ 3. Механические передачи.

Наиболее распространенными передачами являются: 1) ременная (чрезвычайно редко канатная и сталеленточная), 2) зубчатая (цилиндрическая и коническая, также цепная), 3) червячная, 4) фрикционная, к которой необходимо отнести и „центратор-передачу“, роликковую и т. п.; 5) гидравлическая, как наиболее совершенный представитель „регулируемых“ передач.

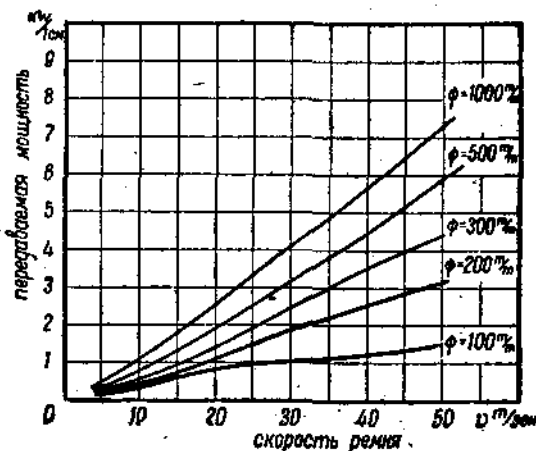
Для непосредственного соединения двигателя со станком наиболее часто применяются муфты: 1) жесткая, 2) эластичная, 3) центробежная, 4) электромагнитная.

1) Ременная передача имеет почти исключительное применение в групповом приводе, как наиболее эластичная, смягчающая всякие удары нагрузки скольжением ремня, *) и допускающая реверсирование и остановку отдельных станков весьма простыми средствами (прямым и перекрещенным ремнем и холостыми шкивами).

При одиночном же приводе достоинства эти не играют роли, и ременная передача применяется только в исключительных случаях в виду своей громоздкости, опасности и негигиеничности (так как затемняет помещение и увлекает в своем движении пыль).

Область применения ременной передачи ограничивается предельными значениями скорости ремня, которая по мнению многих специалистов не должна превышать 50 м/сек.

Некоторые фирмы, как, например, Броун Бовери (Brown Boveri Co), вообще не выпускают двигателей свыше 1500 об/мин в выполнении для ременного шкива.



Фиг. 421.

Расчетные значения усилий, передаваемых 1 см ширины ремня, для различных диаметров шкива можно получить из фиг. 421 или из табл. 117 и 118 (где усилия даны на 10 см. ширины), а ширину нормальных шкивов и ремней — из таблицы 119.

Что касается к. п. д. ременной связи, то, как известно, он зависит от: 1) скольжения, 2) жесткости ремня и 3) сопротивления воздуха.

Следовательно, общий к. п. д. ременной связи η_R может быть выражен таким образом:

$$\eta_R = \eta_s \cdot \eta_n \cdot \eta_v \quad (308)$$

где η_s — к. п. д., учитывающий потери на скольжение ремня,

η_n — к. п. д., учитывающий потери от жесткости

η_v — к. п. д., учитывающий потери на сопротивление воздуха.

*) Таким образом ударная работа одного станка если и отзывается на работе другого через общую трансмиссию, то в значительно смягченном виде.

ТАБЛИЦА 117.

Мощность, передаваемая ordinary ремнем на каждые 100 мм ширины.

Диаметр шкива mm	О к р у ж н я я с к о р о с т ь р е м н я m/sec																	
	2,93	3,35	3,77	4,19	4,71	5,24	5,9	6,6	7,4	8,4	9,4	10,5	11,7	13,7	14,7	16,8	18,8	20,9
100	0,9	1,1	1,3	1,4	1,7	1,9	2,2	2,6	3,0	3,4	3,9	4,5	5,3	6,3	7,6	9,0	10,0	11,0
112	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8	3,2	3,7	4,3	4,9	5,7	6,8	8,2	9,7	10,9	12,0
125	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2	2,6	3,0	3,4	4,0	4,6	5,4	6,3	7,4	8,9	10,4	11,8	13,0
140	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,8	3,2	3,7	4,3	5,0	5,8	6,8	8,0	9,6	11,1	12,7	14,1
160	1,3	1,5	1,7	2,0	2,2	2,6	3,0	3,4	4,0	4,7	5,5	6,4	7,4	8,7	10,3	12,0	13,6	15,2
180	1,4	1,6	1,9	2,1	2,4	2,8	3,2	3,7	4,3	5,1	5,9	6,8	7,9	9,3	11,0	12,7	14,5	16,3
200	1,5	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,4	4,0	4,5	5,4	6,3	7,3	8,5	9,9	11,6	13,4	15,3	17,3
225	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,2	3,7	4,2	4,8	5,7	6,6	7,7	8,9	10,4	12,1	14,1	16,1	18,2
250	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,4	3,9	4,5	5,1	6,0	6,9	8,0	9,3	10,9	12,7	14,9	16,9	19,1
280	1,9	2,2	2,5	2,8	3,2	3,6	4,2	4,8	5,4	6,4	8,4	9,7	11,3	13,2	15,5	17,7	20,0	22,8
320	2,0	2,4	2,7	3,1	3,5	3,9	4,5	5,1	5,8	6,8	7,8	8,9	10,2	11,8	13,8	16,3	18,6	21,0
360	2,2	2,6	2,9	3,3	3,7	4,1	4,7	5,4	6,1	7,1	8,1	9,3	10,6	12,3	14,3	16,9	19,4	22,0
400	2,4	2,7	3,1	3,4	3,9	4,3	5,0	5,6	6,4	7,4	8,5	9,7	11,0	12,7	14,8	17,5	20,1	22,9
450	2,5	2,9	3,2	3,6	4,0	4,5	5,2	5,9	6,7	7,7	8,8	10,0	11,4	13,1	15,3	18,1	20,8	23,8
500	2,6	3,0	3,4	3,8	4,2	4,7	5,4	6,2	7,0	8,0	9,1	10,3	11,7	13,5	15,8	18,6	21,4	24,6
560	2,7	3,1	3,5	3,9	4,4	4,9	5,6	6,4	7,2	8,3	9,4	10,6	12,0	13,9	16,2	19,1	22,1	25,4
630	2,8	3,3	3,7	4,1	4,6	5,2	5,9	6,7	7,5	8,6	9,7	11,0	12,4	14,3	16,7	19,5	22,7	26,2
710	2,9	3,4	3,8	4,2	4,8	5,4	6,1	6,9	7,7	8,9	10,0	11,3	12,8	14,7	17,1	20,1	23,2	26,9
800	3,1	3,5	4,0	4,4	5,0	5,6	6,3	7,1	8,0	9,2	10,4	11,7	13,1	15,0	17,5	20,5	23,7	27,5
900	3,2	3,7	4,1	4,6	5,2	5,8	6,5	7,3	8,3	9,5	10,7	12,0	13,4	15,3	17,8	20,8	24,1	27,9
1 000	3,3	3,8	4,2	4,7	5,3	5,9	6,7	7,5	8,5	9,7	10,9	12,2	13,6	15,5	18,0	21,1	24,3	28,2
1 120	3,4	3,9	4,3	4,8	5,4	6,0	6,8	7,6	8,6	9,8	11,0	12,4	13,8	15,7	18,2	21,3	24,5	28,5
1 250	3,5	4,0	4,4	4,9	5,5	6,2	7,0	7,8	8,8	10,0	11,2	12,6	14,0	15,9	18,4	21,5	24,7	28,7
1 400	3,6	4,1	4,5	5,0	5,6	6,3	7,1	7,9	8,9	10,2	11,4	12,8	14,2	16,1	18,6	21,7	24,9	28,9
1 600	3,7	4,2	4,6	5,1	5,7	6,4	7,3	8,0	9,0	10,4	11,6	13,0	14,4	16,3	18,8	21,9	25,2	29,1
1 800	3,8	4,3	4,8	5,3	5,9	6,6	7,5	8,3	9,3	10,6	12,0	13,4	14,9	16,9	19,7	22,6	25,9	30,2
2 000	4,0	4,5	5,0	5,5	6,1	6,8	7,7	8,7	9,9	11,4	12,9	14,5	16,1	18,2	21,1	24,0	27,4	31,1

ТАБЛИЦА 118.

Мощность, передаваемая двойными ремнями на каждые 100 мм ширины.

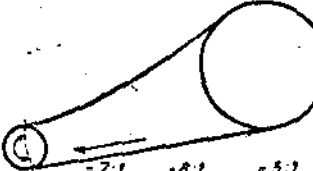
Диаметр mm	О к р у ж н а я с к о р о с т ь р е м н я m/sec														
	4,71	5,24	6,6	7,4	8,4	9,4	10,5	11,7	13,1	14,7	16,8	18,8	20,9	23,6	26,2
450	4,3	4,6	6,6	7,6	8,9	10,4	11,7	13,3	15,3	17,6	20,5	23,6	27,3	32,0	36,1
500	4,6	5,3	7,1	8,1	9,5	10,9	12,4	14,1	16,2	18,7	22,1	25,5	29,5	34,5	38,8
560	5,0	5,7	7,6	8,7	10,1	11,6	13,3	15,1	17,4	20,1	23,9	27,7	31,9	37,5	42,1
630	5,3	6,1	8,1	9,4	10,9	12,5	14,3	16,3	18,8	21,8	25,9	30,0	34,1	40,7	45,7
710	5,9	6,7	8,9	10,1	11,8	13,4	15,4	17,6	20,4	23,6	28,0	32,6	37,6	43,9	49,6
800	6,4	7,3	9,6	10,9	12,7	14,4	16,5	18,9	21,8	25,3	30,1	35,1	40,3	47,1	53,4
900	7,0	7,9	10,2	11,6	13,5	15,4	17,6	20,2	23,3	26,9	32,1	37,3	43,0	51,0	57,1
1 000	7,5	8,4	10,9	12,3	14,3	16,2	18,5	21,2	24,4	28,3	33,7	39,2	45,1	52,8	60,1
1 120	7,9	9,0	11,5	13,0	15,1	17,1	19,4	22,2	25,6	29,6	35,3	41,0	47,2	55,9	63,2
1 250	8,4	9,5	12,1	13,6	15,7	17,9	20,3	23,2	26,7	30,8	36,7	42,7	49,2	57,9	66,1
1 400	8,9	10,0	12,6	14,2	16,3	18,5	21,0	24,0	27,6	32,0	38,2	44,4	51,3	60,5	69,0
1 600	9,3	10,3	13,1	14,7	16,9	19,1	21,7	24,7	28,6	33,3	39,8	46,3	53,4	63,0	72,1
1 800	9,4	10,5	13,3	15,0	17,2	19,4	22,0	25,2	29,2	34,3	41,1	47,9	55,3	65,2	74,5
2 000	9,5	10,7	13,5	15,2	17,4	19,6	22,2	25,5	29,6	35,0	42,0	49,0	56,6	66,4	75,8
2 250	9,6	10,8	13,6	15,3	17,5	19,7	22,4	25,8	30,1	35,7	43,0	50,2	57,8	67,6	77,1
2 500	9,7	10,9	13,8	15,5	17,7	19,9	22,6	26,0	30,4	36,0	43,6	51,0	58,6	68,4	77,9
2 800	9,9	11,0	13,9	15,6	17,8	20,0	22,8	26,3	30,7	36,3	44,2	51,5	59,1	68,9	78,4
3 200	10,1	11,2	14,1	15,8	18,0	20,2	23,0	26,6	31,1	36,6	44,5	51,8	59,4	69,3	78,6
3 600	10,3	11,3	14,3	16,0	18,2	20,4	23,2	26,9	31,4	36,8	44,8	52,1	59,8	69,7	78,8

ТАБЛИЦА 119.

Нормальные величины ремней и шкивов по данным фирмы Бюльфельд (в мм).

Ширина шкива мм	40	50	60	70	85	100	120	140	170	200	230	260	300	350	400	450	500
	30	40	50	60	70	85	100	120	140	170	200	230	260	300	350	400	450
Ширина ремня мм	30	40	50	60	70	85	100	120	140	170	200	230	260	300	350	400	450

В этой формулировке η_R не учтены потери на трение в цапфах в силу того, что последние не являются характерными для ременной передачи, но преимущественно зависят от конструкции подшипни-

расположение привода	наиб допуст передаточное отношение при		
	l_{max}	l_{norm}	l_{min}
	расстоянии между осями		
почти горизонтальное	 $i_{max} = 10:1$ $i_{norm} = 8:1$ $i_{min} = 6:1$	 $i_{max} = 7:1$ $i_{norm} = 6:1$ $i_{min} = 5:1$	
	 $i_{max} = 8:1$ $i_{norm} = 6.5:1$ $i_{min} = 5:1$	 $i_{max} = 5:1$ $i_{norm} = 4.5:1$ $i_{min} = 4:1$	
косой вверх	 $i_{max} = 7:1$ $i_{norm} = 6:1$ $i_{min} = 5:1$	 $i_{max} = 5:1$ $i_{norm} = 4.5:1$ $i_{min} = 4:1$	
	 $i_{max} = 6:1$ $i_{norm} = 5:1$ $i_{min} = 4:1$	 $i_{max} = 5:1$ $i_{norm} = 4:1$ $i_{min} = 3:1$	

Фиг. 422.

ков и качества смазки. В свою очередь каждый из составляющих коэффициентов зависит от целого ряда причин, как, например:

а) η , зависит от диаметра шкивов, расстояния между ними (см. табл. 120 и 121), состояния поверхности шкивов, предварительного натяжения и т. д.;

б) η , главным образом зависит от толщины и качества материала ремня, а кроме того и от скорости ремня;

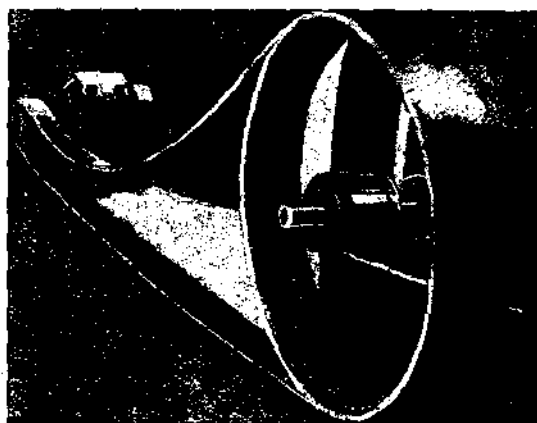
с) η , зависит от конструкции шкива.

В среднем теоретически можно считать, что $\eta_0 = 0,98$, $\eta_1 = 0,99$, в силу чего $\eta_R = 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,99 = 0,95$.

Практически, вследствие перетяжки ремней, перекоса валов и т. д., значение к. п. д. ременной связи несколько ниже, и в среднем для предварительных подсчетов можно принять его равным 0,9 или, принимая во внимание потери в цапфах, 0,85 для передачи в целом.

По опытам инж. Гартмана на заводах AEG для двухступенчатой передачи получены следующие значения к. п. д. ременных передач, с учетом потерь в цапфах:

для $\frac{1}{4}$ нагрузки . = 0,64
 " $\frac{8}{4}$ " . = 0,58
 " $\frac{1}{4}$ " . = 0,49



Фиг. 423.

Что касается устройства самой передачи в отношении расположения шкивов и допустимого передаточного числа (u *), то оно видно из фиг. 422. Наилучшей передачей в отношении к. п. д. является передача с горизонтально расположенной нижней ведущей частью ремня, когда передаточное число $u_{\max}$ достигает наивысшего значения вследствие наибольшего угла обхвата ремнем малого шкива (фиг. 423).

Значение нормального и наименьшего расстояния между осями шкивов ременной передачи приведено в табл. 120 и 121.

ТАБЛИЦА 120.

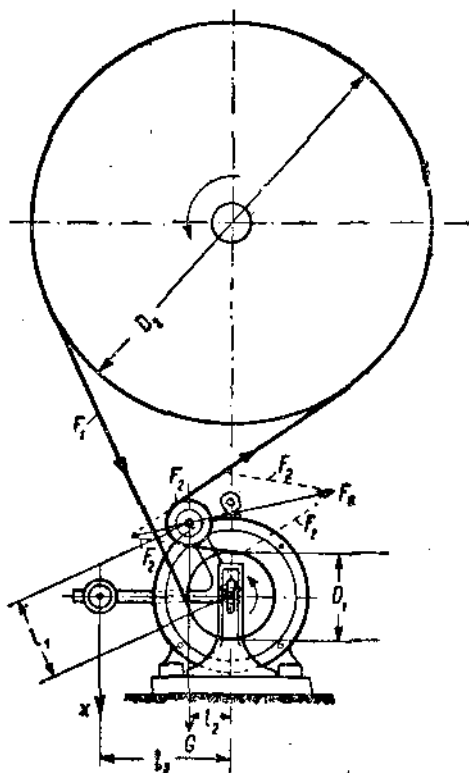
Разность диаметров шкивов в мм	Ширина ремня в см							
	6	8	10	12	14	16	18	20
400	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5
500	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6
600	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
700	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9
800	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
900	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1
1000	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3
1100	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4
1200	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6
1400	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8

*) Определение передаточного числа u см. примечание к этой букве в таблице „Условных обозначений“ в конце книги.

ТАБЛИЦА 121.

Наименьшие расстояния между шкивами (в м)

Диаметр меньшего шкива в мм	Диаметр большего шкива в мм										
	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
50	0,5	0,75	0,1	1,25	1,5	1,75	1,9	2,2	2,4	2,75	2,90
100	—	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,50	2,75
150	—	—	0,8	0,8	1,1	1,30	1,6	1,9	2,1	2,4	2,6
200	—	—	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,50
250	—	—	—	0,6	0,9	1,10	1,3	1,6	1,9	2,1	2,4
300	—	—	—	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25
350	—	—	—	—	0,70	0,9	1,1	1,4	1,6	1,9	2,1
400	—	—	—	—	0,6	0,8	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
450	—	—	—	—	—	0,75	0,9	1,1	1,4	1,6	1,9
500	—	—	—	—	—	0,7	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75



Фиг. 424.

Водиночном приводе ременная передача, если и применяется в станках, приспособленных для нее, то обычно получает добавочное приспособление в виде нажимного ролика („Lenix“), делающего передачу более компактной.

Угол обхвата малого шкива, как видно из фиг. 424, не является при этом функцией расстояния между осями, но оказывается до некоторой степени пропорциональным нагрузке, так как при растяжении ремня угол несколько увеличивается, что весьма ценно.

Благодаря большому углу обхвата возможно допустить малое натяжение ремня. В то время как в обычной передаче при полезном усилии F кг натяжение ведущей части ремня приблизительно равно $2F$, а ведомой F кг, при нажимном ролике натяжение ведущей части практически может быть доведено до $1,1 F$ кг, а ведомой — $0,1 F$, и в среднем,

следовательно, давление на подшипник в два раза меньше. Поэтому к. п. д. передачи „Леникс“, несмотря на двойной перегиб

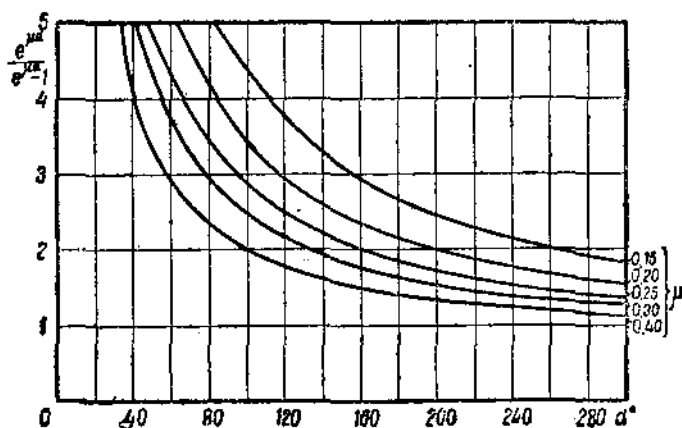
ремня, оказывается не ниже, чем у обычной, и по некоторым данным даже выше (около 92%).

Уменьшение натяжения в ведущей части ремня, а следовательно и в ведомой, в случае применения ролика „Леникс“ теоретически должно быть отнесено, во-первых, за счет увеличения угла обхвата шкива ремнем, а во-вторых, за счет увеличения коэффициента трения между ремнем и шкивом. В самом деле, натяжение ведущего ремня, как известно, определяется по формуле:

$$F_1 = \frac{F \cdot e^{\mu\alpha}}{e^{\mu\alpha} - 1} + \frac{G \cdot v^2}{g}, \quad (309)$$

где F — передаваемое усилие в кг, $e = 2,7182$, μ — коэффициент трения, α — угол обхвата шкива ремнем, G — вес погонного метра ремня, v — скорость ремня (м/сек), g — ускорение силы тяжести (м/сек²).

Величина $\frac{e^{\mu\alpha}}{e^{\mu\alpha} - 1}$ уменьшается с увеличением угла обхвата, как это видно из графика фиг. 425. То же происходит с этой величиной и при увеличении μ . Следовательно, при одновременном увеличении α и μ значение F_1 уменьшается и практически достигает значения



Фиг. 425.

1,1 F . Натяжение в ведомой части ремня определяется как разница между натяжением в ведущей части и передаваемым усилием, а потому при уменьшении значения F_1 уменьшается соответственно и значение натяжения в ведомой части ремня.

Естественно, что передаточный коэффициент u также значительно выше и достигает 15/1.

Большим достоинством такой передачи является возможность пуска двигателя без нагрузки, путем поднятия груза x рукой (фиг. 424).

Надо заметить, что нажимной ролик обязательно должен быть установлен на ведомой части ремня, где усилия незначительны, всего около 0,1 F , и двойной перегиб его под роликом не оказывает заметного вреда ремню, тем более что последний берется

топким и склеенным в местах соединения, а не сшитым. В виду большого практического значения передачи с натяжным роликом ниже приводится примерный расчет:

Пример. Дано: Передаваемая мощность 20 л. с.

Число оборотов двигателя в 1 мин. — 1600.

Диаметр шкива двигателя $D_1 = 24$ см.

Передаточное число $u = 8:1$.

Расстояние между осями валов = 144 см.

Окружная скорость ремня

$$v = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,24}{60} 1600 \cong 200 \text{ м/сек.}$$

Угол обхвата ремнем меньшего шкива может быть определен аналитически или графически. Для рассматриваемого случая $\alpha = 240^\circ$.

Передаваемое усилие:

$$F = \frac{75 \cdot P}{v} = \frac{75 \cdot 20}{20} = 75 \text{ кг.}$$

Примем усилие, передаваемое 1 см ширины ремня: $f = 10$ кг, тогда ширина ремня будет для данного случая равна

$$b = \frac{F}{f} = \frac{75}{10} = 7,5 \text{ см.}$$

Возьмем с некоторым запасом ремень шириной в 80 мм.

Натяжение в ведущей части ремня, как известно, может быть вычислено по формуле (309):

$$F_1 = \frac{F \cdot e^{\mu \alpha_1}}{e^{\mu \alpha_1} - 1} + \frac{G \cdot v^2}{g};$$

здесь G — вес погонного метра ремня — равен 0,49 кг, α_1 — угол обхвата ремнем малого шкива = 240° , μ — коэффициент = 0,25.

Для $\alpha_1 = 240^\circ$ и $\mu = 0,25$ значение $\frac{e^{\mu \alpha}}{e^{\mu \alpha} - 1}$ получаем из фиг. 416; оно равно 1,55; тогда

$$F_1 = 75 \cdot 1,55 + \frac{0,49 \cdot 20^2}{9,81} = 136 \text{ кг.}$$

При толщине ремня $\delta = 0,55$ см получаем напряжение в нем:

$$k_1 = \frac{F_1}{q} = \frac{F_1}{b \delta} = \frac{136}{8 \cdot 0,55} = 31 \text{ кг/см}^2.$$

При модуле упругости ремня, равном 2000 кг/см, имеем напряжение в ремне от перегиба

$$k_2 = E \cdot \frac{\delta}{D_1} = 2000 \frac{0,55}{24} = 46 \text{ кг/см}^2.$$

Итого суммарное напряжение в ремне:

$$k = k_1 + k_2 = 31 + 46 = 77 \text{ кг/см}^2,$$

что является допустимым.

Натяжение ведомого конца ремня будет равно:

$$F_2 = F_1 - F = 136 - 75 = 61 \text{ кг.}$$

Построив на силах F_R параллелограм (фиг. 424), найдем усилие $F_R = 119 \text{ kg}$, с которым ролик должен нажимать на ремень.

Для равновесного состояния усилий, действующих на ролик, можем написать:

$$F_R \cdot l_1 = G_R \cdot l_2 + x \cdot l_3,$$

где G_R — вес ролика (kg), x — искомый вес груза (kg), l_1 , l_2 и l_3 — соответственные плечи. Отсюда

$$x = \frac{F_R \cdot l_1 - G_R \cdot l_2}{l_3}. \quad (310)$$

Задавшись значениями l_1 , G_R , l_2 и l_3 , получим искомый вес груза x . Для $F_R = 119 \text{ kg}$, $G_R = 20 \text{ kg}$, $l_1 = 25 \text{ cm}$, $l_2 = 15 \text{ cm}$, $l_3 = 50 \text{ cm}$ получаем

$$x = 53,5 \text{ kg}.$$

Для упрощения расчетов и возможности быстрого подбора натяжного ролика различные фирмы дают специальные таблицы. Ниже (в табл. 122 и 123) приведены данные фирмы Флендер (Дюссельдорф, Германия) о мощности, передаваемой ординарным и двойным ремнем на каждые 100 мм ширины ремня в условиях работы последнего с роликом „Леникс“.

ТАБЛИЦА 122.
Ординарный ремень.

Диаметр малого шкива mm	Скорость ремня m/sec										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30
100	2	3	4,5	6,5	8	10,5	12	15	16	21,5	28
200	2,6	4	6	8,5	11,5	14	15,5	18	21	27	36
300	4	5,5	8	11	14,5	18	21	24	27	36	47
400	5	6	9	12,5	15,5	20	22	24,5	29,5	40	50
500	5,5	7	10,5	14,5	18,5	22	25	28	32	44	58
600	5,8	7,5	11	15,5	19	22,5	26	28,5	33,5	46	60
700	6	8	11,5	16	19,5	23	27	29	35,5	48	62
800	6,2	8,2	13	18	21	26	29	33	37,5	50	66
900	6,5	8,5	14	18,5	21,5	27	30	34	38,5	52	68
1000	7	9	15	19	22	28	31	34,5	40	53	70

ТАБЛИЦА 123.
Двойной ремень.

Диаметр малого шкива mm	Скорость ремня в m/sec										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30
500	6	9	12,5	16,5	23	27	31	34	42	—	—
600	6,5	9,5	13,5	18	24	28,5	33	36	42,5	56	—
700	7	11	14,5	19,5	26	30	34	38	43	58	70
800	7,5	12	15,5	21	27	32	36	40	46	62	75
900	9	14,5	19	25	32	39	43	50	56	74	92
1000	9,5	15,5	20	27	33,5	40	45	51	58	76	94
1250	10,5	16	21,5	28	35	42	47	53	60	80	96
1500	11	17	22,5	29	37	43	51	56	65	84	100

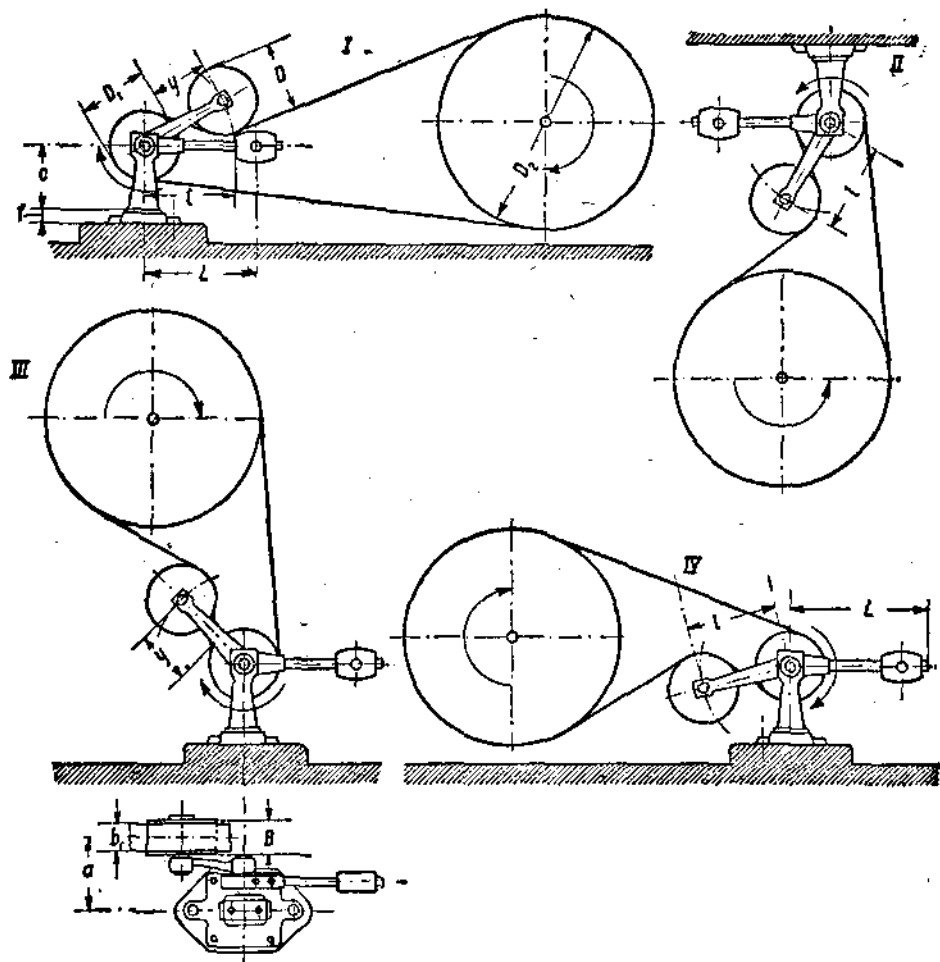
В табл. 124 даны основные размеры и цены в германских марках натяжных роликов фирмы Вюльфель (Ганновер, Германия) согласно буквенным обозначениям фиг. 426 для четырех вариантов расположения передачи (I, II, III, IV).

№ натяжного ремня	Ширина ремня <i>b</i> мм	Ролик		Стойка, вклю- чая основную плиту <i>C+f</i> мм	<i>a</i> мм	<i>y</i> мм	Плечо ролика <i>l</i> мм	Плечо груза <i>L</i> мм
		Диаметр	Ширина					
		<i>D</i> мм	<i>B</i> мм					
6	до 55	80	60	125, 175, 225	110	160	100 150	300 300
8½	до 80	112	85	130, 180, 230	145	80	125 175	350 250
10	до 90	140	100	180, 230, 280, 330	175	95	150 200 250 300	410 410 480 550
14	до 110	160	120	235, 285, 335, 385, 435	220	100	200 250 300 350 400	510 510 580 650 720
	до 130	200	140			130		
20	до 160	225	170	235, 285, 335, 385, 435	280	145	250 300 350 400 450	590 590 660 730 800
	до 190	280	200			170		
26	до 200	320	230	340, 390, 440, 490, 540	340	195	300 350 400 450 500	680 680 750 820 890
	до 240	360	260			215		
35	до 280	400	300	340, 390, 440, 490, 540	430	235	400 450 500 550 600	790 860 930 1 000 1 070
	до 330	450	350			260		
45	до 370	500	400	345, 395, 445, 495, 545	530	290	500 550 600 650 700	1 040 1 040 1 110 1 180 1 250
	до 420		450					

Р а с п о л о ж е н и е (по фиг. 426):

I		II		III		IV	
Общий вес в кг	Цена марок	Общий вес в кг	Цена марок	Общий вес в кг	Цена марок	Общий вес в кг	Цена марок
8	68	8	68	10	70	10	70
16	80	19	82	21	84	23	85
29	98	32	100	36	103	39	105
45	135	50	138	55	140	61	145
50	138	55	140	61	145	66	150
69	180	76	185	84	190	91	195
76	185	84	190	91	195	99	200
112	244	123	252	135	260	146	264
123	252	135	260	146	264	157	270
184	365	202	375	220	382	238	390
		220	382	238	390	257	402
292	510	321	524	380	550	410	565

Здесь не безынтересно привести несколько графиков, составленных на основании данных каталога фирмы Йон в довоенных рублях и представляющих собою зависимость стоимости трансмиссии (на один станок) от мощности станков при различном их числе и при коэффициенте одновременности, равном 0,5.



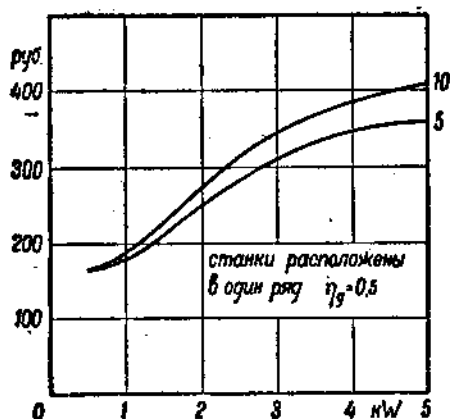
Фиг. 426.

График фиг. 427 а относится к случаю расположения станков в один ряд, а график фиг. 427 б — к расположению в два ряда. На фиг. 428 дана стоимость отдельных элементов трансмиссии в процентах от общей стоимости в зависимости от мощности станка.

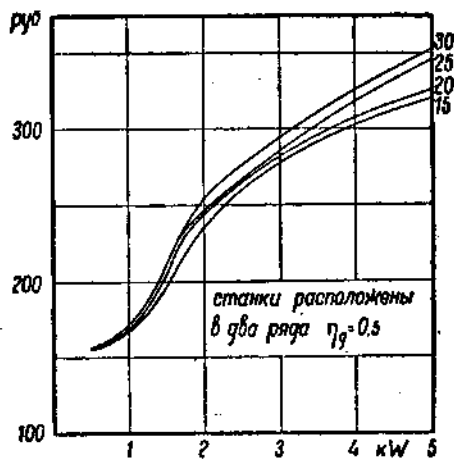
Как видно, стоимость контрпривода доминирует, особенно при малых станках.

Для определения полной стоимости трансмиссии, очевидно, необ-

ходимо включить цену ремней. В таблице 125 указана стоимость 1 м ординарного ремня в зависимости от ширины, причем для определения стоимости двойного ремня цену ординарного необходимо увеличивать вдвое. Цены относятся к 1931 г.



Фиг. 427 а.



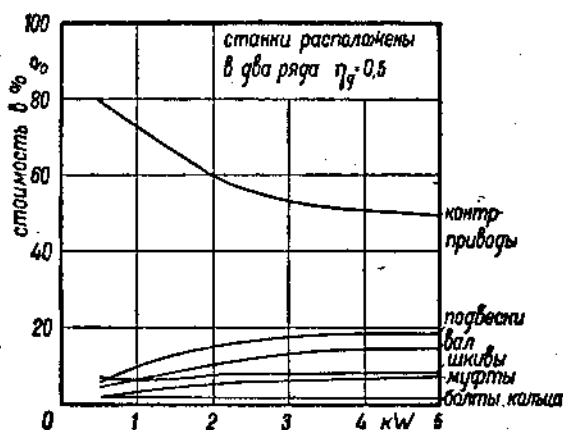
Фиг. 427 б.

ТАБЛИЦА 125.

Ширина ремня 1 в мм	25	35	50	65	75	100	125	150	175
Стоимость 1 м в руб.	0,79	1,1	1,73	2,3	2,7	3,9	5,1	6,4	7,8

К ременным передачам необходимо отнести и передачи, предназначенные для регулировки числа оборотов, как, например, клиновую передачу „Variator“ и передачу с конусными шкивами, о которых более подробно будет сказано ниже в отделе регулируемых передач.

Канатная передача применяется при больших мощностях и передаче на значительное расстояние как в крупногрупповом приводе, так изредка и в одиночном (прокатные станы).



Фиг. 428.

Передаточный коэффициент i не превышает 6/1.

Некоторым руководством при выборе может служить табл. 126.

Коэффициент полезного действия канатной связи составляется из тех же компонентов, как и к. п. д. ременной связи, и в среднем для предварительных подсчетов может быть принят равным 0,90.

Стальная ленточная передача имеет значительные преимущества перед ременной и канатной в отношении предельных допускаемых скоростей ленты, которая может быть доведена до 100 м/сек. Коэффициент полезного действия такой передачи очень велик, доходя в некоторых случаях до 0,98—0,99.

2) Зубчатая передача, достаточно известная из прикладной механики, пользуется наибольшим распространением в одиночном приводе. Как и червячная, она позволяет применять для привода быстроходные двигатели, причем устройство получается в достаточной мере компактным*) и обладает лучшим к. п. д., нежели в случае непосредственного соединения машины с тихоходным двигателем.

ТАБЛИЦА 126.

Диаметр каната в мм	Диаметр меньшего шкива в мм		Допустимая полезная нагрузка на 1 канат в кг	Передаваемая мощность в л. с. на 1 канат при скорости каната в м/сек			
	Для пенькового каната	Для бумажного каната		10	15	20	25
30	900	600	45	6	9	12	15
35	1 050	700	60	8	12	16	20
40	1 200	800	80	10,5	16	21	26,5
45	1 350	900	100	13,3	20	26,6	33,3
50	1 500	1 000	125	16,6	25	33,3	41,6

Например, по подсчетам фирмы Броун-Бовери (Preisliste 23, 1925 г.), для привода цементной мельницы, требующей 400 л. с. при 161 об/мин, можно применить или непосредственное соединение с двигателем, имеющим 167 об/мин (синхронных), или соединенные с быстроходным двигателем на 1000 об/мин (синхронных) через посредство зубчатой передачи. Подсчет показывает, что в последнем случае получается 30% экономии в установленной стоимости привода, 1% улучшения общего к. п. д. привода и 20% улучшения $\cos \varphi$.

Отметим только необходимые для составления вариантов величины: передаточного коэффициента i от 4:1 до 10:1 и к. п. д. от 0,9 до 0,98 в зависимости от выполнения.

Целым рядом сравнительных опытов, поставленных в Коттерне

*) Выше, в главе V „Типы двигателей“, при описании двигателей со встроенными зубчатыми передачами были даны габариты и цены передач. На фиг. 270 было показано уменьшение требуемой площади, достигаемое такими комплектами передачами по сравнению с нормальными. К. п. д. таких передач, шлифованных и работающих в масле, достигает 98%.

на электрифицированной прядильной фабрике, к. п. д. зубчатой передачи установлен в среднем на 6% выше, чем ременной.

Коэффициент полезного действия зубчатой передачи без учета потерь в цапфах, как известно, равен

$$\eta = 1 - \mu \pi \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right), \quad (311)$$

где μ — коэффициент трения, изменяющийся в пределах от 0,15 до 0,03; z_1 — число зубцов большого колеса; z_2 — число зубцов малого колеса.

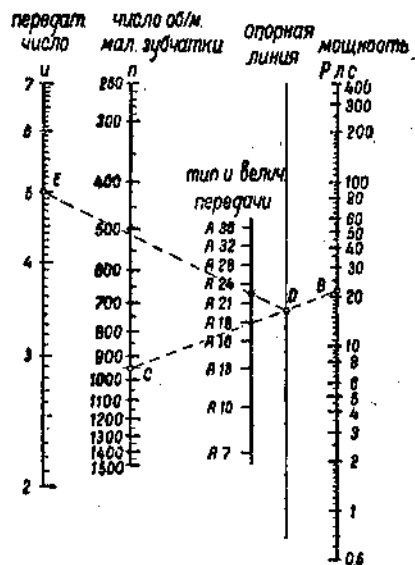
Если принимать в расчет потери в цапфах, то, очевидно, полученный выше коэффициент необходимо умножить на к. п. д. цапф, который равен

- 0,94 — при плохой смазке
- 0,97 — " фитильной смазке
- 0,98 — " кольцевой "
- 0,99 — " шариковых подшипниках.

Для предварительных подсчетов можно общий к. п. д. зубчатой передачи принять равным 0,92.

Чрезвычайно спокойным и бесшумным ходом отличаются «шеvronные» зубчатые колеса, применяемые для ударной нагрузки, причем коэффициент передачи свободно достигает 10/1.

Для характеристики работы шевронных зубчатых колес ниже приведена табл. 127 полезной отдачи в процентах для колес московского завода «Шестерня», б. «Цитроэн», с углом наклона 25 и 45°. В той же таблице для сравнения приведены данные для нормальных колес с прямым зубом.



Фиг. 429.

ТАБЛИЦА 127.

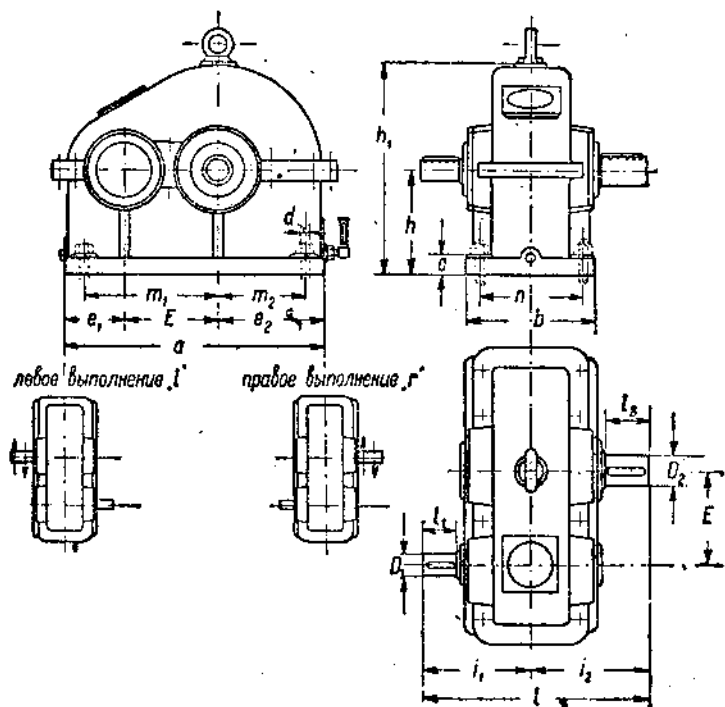
Передаточное число и	К. п. д. передачи в %				
	Шевронный литой зуб $\alpha = 25^\circ$	Прямой литой зуб (обычная зубчатая передача)	Шевронный фрезерованный зуб $\alpha = 25^\circ$	Прямой фрезерованный зуб (обычная зубчатая передача)	Шевронный фрезерованный зуб $\alpha = 45^\circ$
1:1	95,0	95,2	97,5	97,6	98,7
5:1	94,0	94,2	97,0	97,1	98,4
10:1	93,0	93,2	96,5	96,6	98,1
20:1	—	—	—	—	94,6

В целях облегчения выбора зубчатых передач крупнейшие фирмы (например Демаг, Вюльфель и т. п.) дают в своих каталогах номограммы. На фиг. 429 приведена такая номограмма фирмы Вюльфель для выбора одноступенчатой зубчатой передачи с передаточным числом u от 2 : 1 до 7 : 1.

Пример. Даны: мощность $P = 22$ л. с., число оборотов вала малого зубчатого колеса $n = 950$ об/мин, то же — большого колеса $n = 190$ об/мин; иными словами, $u = \frac{950}{190} = 5 : 1$.

Требуется подобрать передачу.

Для этого точка B на линии мощностей P соединяется с точкой C на линии n об/мин малого колеса. Точка D , полученная от пересечения



Фиг. 430.

линии CB с опорной линией, соединяется с точкой E на линии передаточных чисел u ($u = 5$), и в пересечении линии ED с линией передач находится требуемая величина передачи. Принимается ближайшая большая передача $A = 24^*$.

Вес и габарит передачи, руководясь буквенными обозначениями фиг. 430, можно получить из таблицы 128.

В настоящее время начинает сильно распространяться бесшумное зубчатое зацепление с малым колесом, изготовленным из фибры или кожи; к. п. д. его несколько понижен по сравнению с металлическими колесами.

ТАБЛИЦА 128.

Тип и величина	Расстояние между налами в мм	Размеры фундаментной плиты мм						Высота мм		Фундаментные болты мм				Размеры концов валов мм								Вес кг
		E	a	b	c	e ₁	e ₂	h	h ₁	t ₁	t ₂	n	d	l	l ₁	D ₁	l ₁	i ₂	D ₂	l ₂		
A — 7	72	210	140	15	53	85	80	160	100	60	105	3/8	240	115	15	45	125	25	55	18		
A — 10	100	280	165	20	65	115	120	230	135	85	130	1/2	310	145	20	55	165	30	75	30		
A — 13	130	370	200	25	90	150	145	290	190	120	160	1/2	375	180	25	70	195	40	80	55		
A — 16	160	445	230	30	105	180	170	345	230	145	180	5/8	420	205	30	80	215	45	90	85		
A — 18	185	515	250	30	120	200	200	400	265	170	200	5/8	445	215	35	80	230	50	90	120		
A — 21	210	585	270	30	140	235	230	460	310	195	220	5/8	500	240	40	90	260	60	110	170		
A — 24	240	660	310	35	155	265	260	520	350	220	250	3/4	530	255	45	90	275	70	110	230		
A — 28	280	765	330	35	180	305	300	600	415	260	270	3/4	605	290	50	110	315	80	130	330		
A — 32	320	875	370	40	205	350	350	690	475	300	300	7/8	690	335	60	130	355	90	150	470		
A — 36	360	980	400	40	230	390	400	785	540	340	330	7/8	760	355	70	130	405	100	180	650		

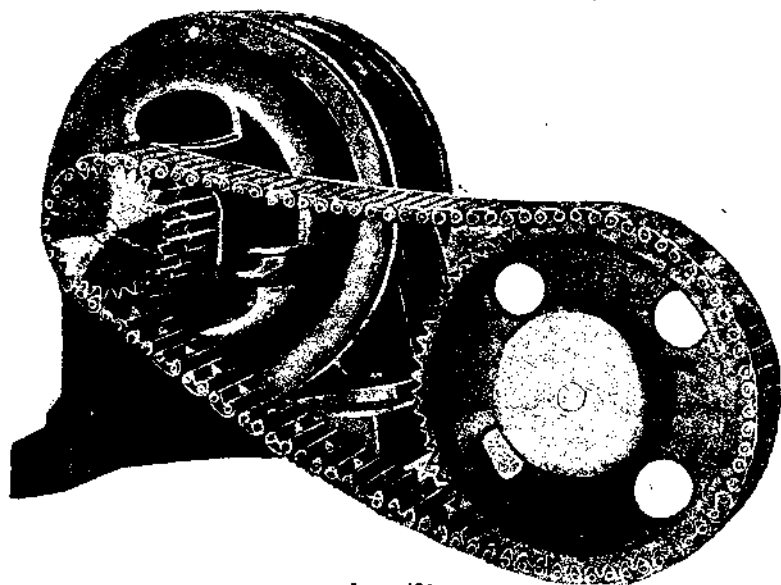
В виду большого распространения такой передачи ниже, в табл. 129, приводятся цены фибровых зубчаток американской фирмы General Electric С-пу в долларах франко-завод.

ТАБЛИЦА 129.

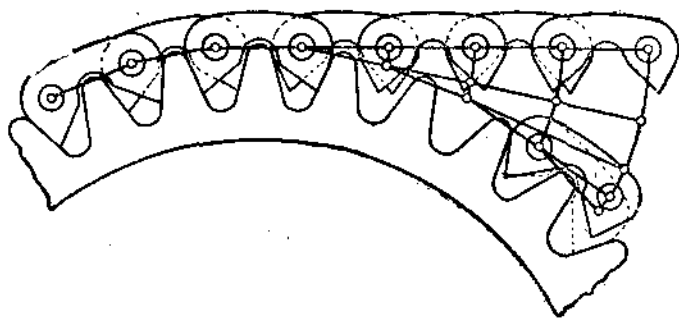
Диаметр вала в мм	Ширина зубчатки в мм											
	25	44,5	57	70	95	121	159	187	222	260	312	335
63,5	5,20	5,65	6,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
76,0	5,20	5,95	6,45	6,95	7,95	—	—	—	—	—	—	—
89,0	5,75	6,60	7,10	7,65	8,75	9,90	—	—	—	—	—	—
101	6,30	7,15	7,80	8,35	9,60	10,90	—	—	—	—	—	—
114	6,75	7,75	8,40	9,20	10,55	10,95	—	—	—	—	—	—
127	—	8,65	9,45	10,25	11,80	13,45	—	—	—	—	—	—
152	—	10,15	11,15	12,10	14,05	16,10	19,30	22,60	—	—	—	—
177	—	12,45	13,65	14,85	17,25	19,65	23,45	27,55	—	—	—	—
203	—	16,65	18,15	19,65	22,70	25,75	—	—	—	—	—	—
228	—	22,55	24,45	26,35	30,15	33,95	39,65	45,35	49,15	—	—	—
254	—	27,00	29,00	31,10	35,20	39,35	45,35	51,80	55,90	60,00	62,15	—
280	—	—	32,10	34,70	39,60	45,10	52,90	60,70	65,90	73,70	84,10	89,30
305	—	—	36,25	39,10	44,75	50,35	58,85	67,30	72,95	81,40	92,65	98,30

К этой же категории передач можно отнести бесшумную цепную передачу, состоящую из ряда параллельных звеньев, соединенных стержнями (фиг. 431a и 431b). Применяется главным образом в одиночном приводе мощностью от 1/4 до 500 kW при небольших расстояниях. Окружная скорость около 6 м/сек и ширина цепи от 12 до 250 мм. Коэффициент полезного действия доходит до 98% при хорошем выполнении.

Для придания жестким передачам, вроде зубчатой, необходимой иногда эластичности применяются особые скользящие соединения („Rutschkupplung“ и „The slip-coupling“, фиг. 281 и 432).



Фиг. 431 а.



Фиг. 431 б.

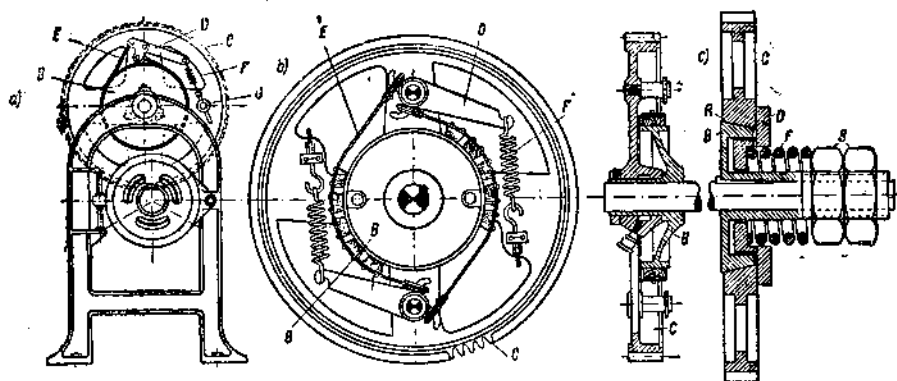
При ударной работе, а также при необходимости быстрой остановки машины, как, например, в ткацком деле при обрыве нити, для предупреждения поломки зубцов в передачах и их быстрого износа одно из зубчатых колес соединяют с валом через посредство таких скользящих соединений.

При внезапной остановке машины живая сила ротора двигателя расходуется на преодоление трения тормозной ленты скользящего соединения и превращается в тепло.

На фиг. 432, а (слева) представлено соединение малого зубчатого колеса двигателя с большим колесом С ткацкого станка.

Колесо С соединено трением ленты Е со шкивом В, вклиненным на валу станка.

Натяжение ленты регулируется поворотным рычагом *D* и пружиной *F*, укрепленными на колесе *C* таким образом, чтобы при нормальных условиях никакого проворачивания колеса *C* относительно шкива *B* не было и чтобы последнее наступало лишь при ударе или внезапной остановке.

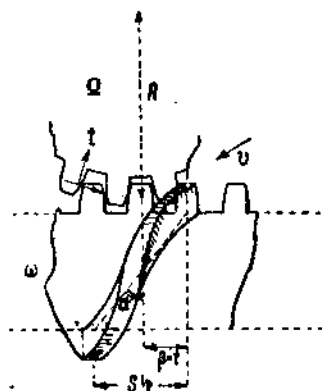


Фиг. 432.

На фиг. 432, *b* (в середине) представлено такое же соединение в исполнении завода Сименс-Шуккерт (DRP-241259), в котором стальная лента *E* заменена двумя лентами с деревянными колodками, чем предупреждается износ шкива *B* и достигается уравновешенность тормозных сил.

Наконец, на фиг. 432, *c* (справа) изображено аналогичное устройство в исполнении завода AEG, где зубчатое колесо *C* прижимается к заклиненному шкиву *B* по конусной поверхности трения *R* посредством тугой пружины *F* и шайбы *D*. Сила нажатия регулируется гайками *S*.

Применение эластичных соединений не уменьшает к. п. д. зубчатых передач, так как никакого скольжения при передаче нормальных усилий не имеется, и по испытаниям баварского О-ва надзора за паровыми котлами и завода Сименс-Шуккерт для сравнения таких эластичных зубчатых передач и ременных передач с качающимися салазками расход энергии оказался при первых меньше на 6,5—20%, чем при вторых.



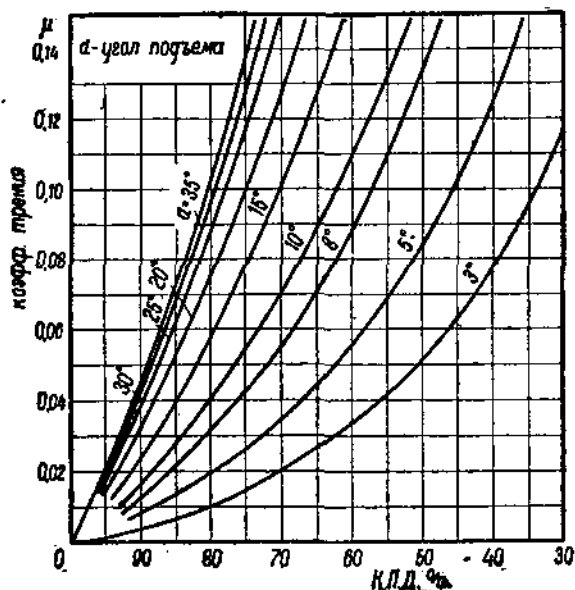
Фиг. 433.

3) Червячная передача после зубчатой наиболее часто применяется в одиночном приводе (фиг. 433).

Передаточный коэффициент η может достигать цифры 75 и выше, правда, за счет понижения к. п. д., выражаемого формулой

$$\eta = \eta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}, \quad (312)$$

где η_1 — к. п. д. цапф (0,9—0,98), α — угол подъема червяка, φ — угол трения (около 6° — между фосфористой бронзой колеса и никелевой сталью червяка).



Фиг. 434.

Для предварительных подсчетов к. п. д. червячных передач достаточной для практики точностью можно пользоваться табл. 130, составленной на основании опытов Stribeck, или графиком фиг. 434 (см. Krell, Entwerfen im Kranbau). Кривые дают к. п. д. без учета потерь в цапфах.

ТАБЛИЦА 130.

Угол подъема	4°	6°	8°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
$\mu = 0,15$	0,29	0,35	0,44	0,48	0,56	0,60	0,62	0,64	0,65	0,66
$\mu = 0,1$	0,37	0,45	0,52	0,57	0,64	0,68	0,70	0,73	0,75	0,755
$\mu = 0,05$	0,54	0,60	0,66	0,69	0,74	0,77	0,80	0,82	0,83	0,835

4) Фрикционная передача имеет применение исключительно в одиночном приводе для небольших мощностей, главным образом там, где требуется пускать двигатель без нагрузки (однофазный асинхронный), т. е. в мелких городских промышленных предприятиях (например типографиях), пользующихся однофазным током городских осветительных станций.

На фиг. 235 были представлены передвигаемые рычагом салазки фрикционной передачи.

Для увеличения поверхности соприкосновения заводом Oerlikon предложена передача (фиг. 435), где второй шкив прижимается противовесом g , причем оба малых шкива обтянуты общим ремнем.

Передаточный коэффициент до 15:1; к. п. д. 0,70—0,80. Вследствие своей конструкции и принципа действия фрикционная передача применяется при небольших мощностях.

К этому же виду передач необходимо отнести центратор-передачу (или „ротатор-передачу“), представляющую чрезвычайно компактную конструкцию. Идея ее ясна из фиг. 436.

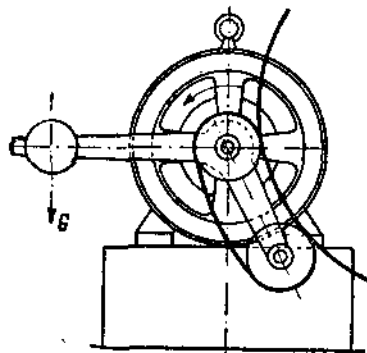
Передаточный коэффициент и зависит от отношения радиусов $r:R$ вала и бегунов и обычно колеблется в пределах 4:1—12:1 при к. п. д. около 0,80—0,90.

На рис. 268 был уже представлен двигатель, построенный в комбинации с центратор-передачей.

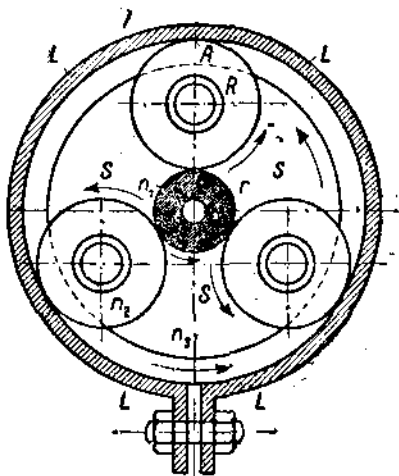
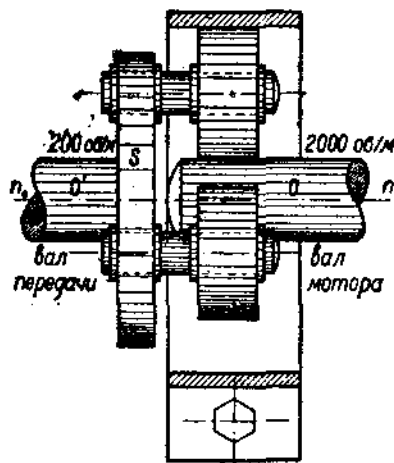
Такие двигатели строятся мощностью от $1/12$ до 7,5 л. с. при числе оборотов 20—300 в минуту на валу со стороны центратора.

Аналогичной с центратор-передачей представляется роликовая передача, изготавливаемая в настоящее время заводом Сименс-Шуккерт в Германии.

На фиг. 269 был представлен разрез этой передачи, составляющей подобно центратору одно целое с двигателем. Вал двигателя 3 связан с наружным валом 6 при помощи передаточного



Фиг. 435.



Фиг. 436.

диска 1 , движущихся роликов 5 и неподвижных 4 . Чрезвычайно удобная и компактная роликовая передача обладает высоким к. п. д.—по данным завода Сименс-Шуккерт около 98%. На фиг. 271 были приведены кривые к. п. д.

§ 4. Механические передачи для регулирования скорости.

Наконец, необходимо упомянуть здесь о механических передачах, с помощью которых возможно в тех или иных пределах изменять передаточное число.

1) К ним в первую очередь должна быть отнесена клиновая передача (или вариатор), представляющая собою видоизменение ременной передачи.

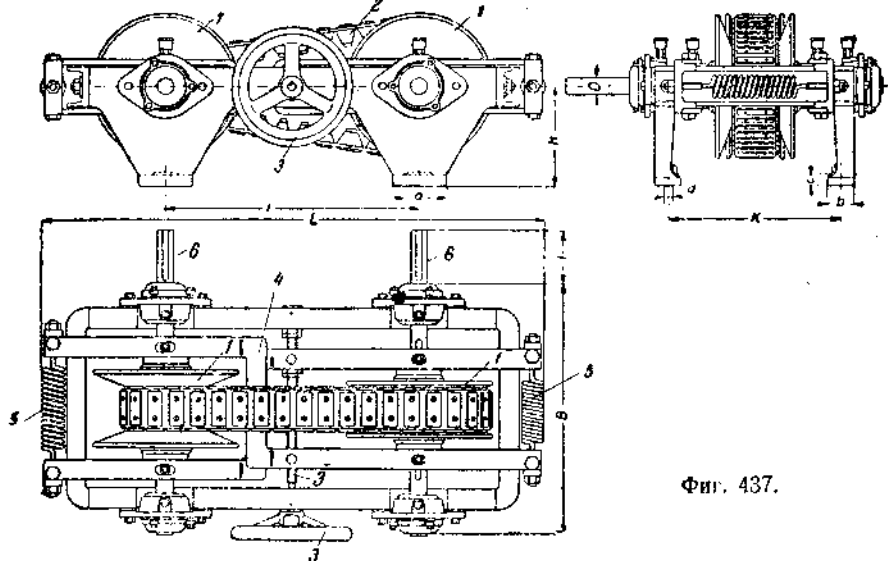
На фиг. 437 изображена клиновая передача в исполнении германского завода Флендер.

Передача состоит из двух пар конусов 1 с двигающейся между ними лентой, на которой укреплены деревянные клинья 2. Маховичок 3 с помощью рычагов 4 и пружин 5 служит для сдвигания и раздвигания конусов; при вращении маховичка одновременно со сближением одной пары конусов происходит расхождение другой пары. Вследствие такого устройства легко изменять соотношение диаметров ведущего и ведомого шкивов, т. е. окружности, по которой происходит соприкосновение ленты с конусом, и тем самым менять передаточное число. В табл. 131 приведены нормальные данные передач Флендера. (буквы по фиг. 437):

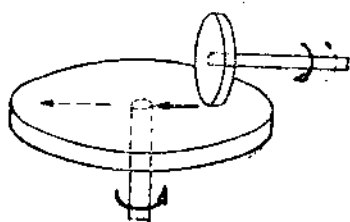
ТАБЛИЦА 131.

Максимальная мощность kW	Величина	H mm	L mm	B mm	i mm	k mm	c mm	d дюймов	a mm	b mm	D mm	l mm	вес kg	Передаточное число и от до
2,7	1	150	760	375	380	260	18	1/2	80	40	25	94	70	2:1 6:1
3,7	2	175	890	445	450	300	20	1/2	100	50	30	128	100	2:1 8:1
5,5	3	200	1025	530	530	360	25	5/8	120	60	35	167	150	2:1 8:1
8,0	4	225	1190	600	620	420	25	5/8	140	70	45	180	240	2:1 8:1
11,0	5	250	1430	670	740	480	30	3/4	160	80	50	200	360	2:1 11:1
15,2	6	300	1665	775	860	550	30	3/4	180	90	55	232	500	2:1 12:1
19,0	7	350	1815	845	920	620	40	7/8	200	100	60	277	660	2:1 12:1
23,0	8	400	2210	1040	1100	760	40	7/8	240	120	70	308	1050	2:1 16:1
29,5	9	500	2590	1260	1250	930	50	1	280	140	80	332	1700	2:1 16:1
37,0	10	600	3050	1430	1500	1060	50	1	320	160	90	385	2600	2:1 6:1

2) К передачам, предназначенным для изменения передаточного числа, необходимо отнести и передачу, изображенную на фиг. 438а и б.



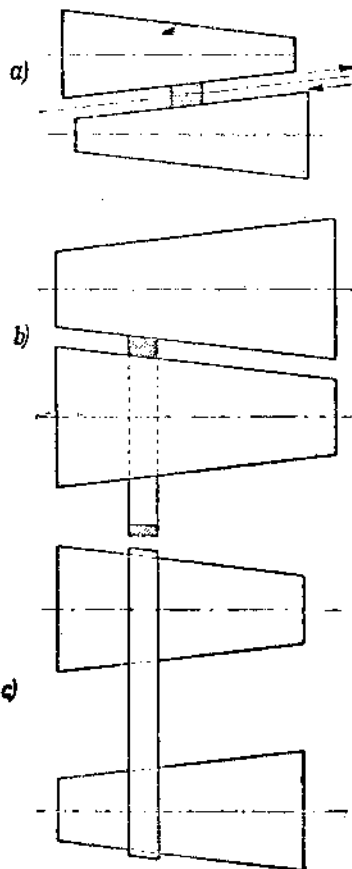
Фиг. 437.



Фиг. 433 а.

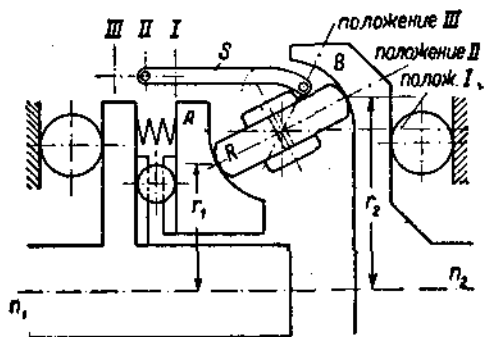


Фиг. 438 б.



Фиг. 439.

с помощью которой при перемещении малого (по стрелке) можно не только изменять передаточное число, но также и реверсировать вращение.



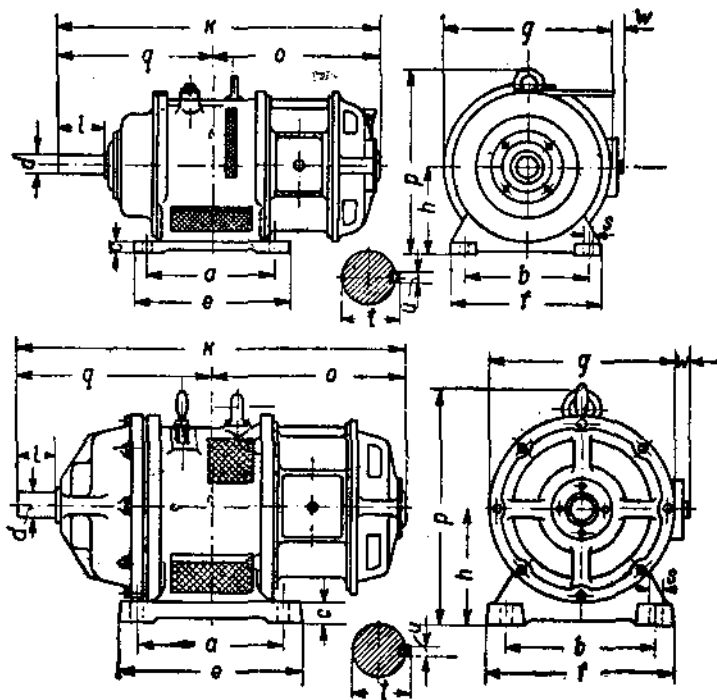
Фиг. 440.

Вследствие низкого к. п. д. указанная передача не имеет широкого применения.

3) То же самое можно сказать и о передаче типа фиг. 439, а и б, где для изменения скорости изменяется положение промежуточного третьего тела (колеса или ремня).

4) Некоторое применение имеет передача с конусными шкивами (фиг. 439, с), где передаточное число меняется передвижением ремня. Коэффициент полезного действия та-

кой передачи, в силу перекоса ремней, невысок, а потому применение ее имеет место лишь при небольших пределах регулировки (небольшом угле конуса) для незначительных мощностей.



Фиг. 441.

5) На том же фрикционном принципе основано действие регулируемой передачи фирмы AEG, тип RG (см. каталог AEG RBl-140, 1930 г.).

На фиг. 440 представлена схема этой передачи, передаточное число u которой меняется поворотом ролика R помощью штанги S .

Таким образом величина u определяется отношением радиусов r_1 и r_2 окружностей, по которым катится ролик R между двумя половинками A и B регулируемой муфты.

В горизонтальном положении ролика (положение I рычага S) $r_1 = r_2$, и, следовательно, $u = 1$. В положении III передаточное число наибольшее и равно 3 при постоянном моменте и 2,5—при постоянной мощности; к. п. д. около 0,90. Стоимость и размеры видны из табл. 132 и 133 и фиг. 441.

ТАБЛИЦА 132.

Регулируемые передачи фирмы AEG для регулировки скорости при постоянном моменте M .

Тип передачи	Мощность kW	Число об/мин	Тип встроенного электродвигателя	Требуемое колич. масла kg	Вес kg	Цена долл.
RG - 1/2,5 до 0,85/4	2,5/0,85	1500/500	AVDD-22/4	0,75	95	320
RG - 4/5 до 1,7/4	5,0/1,7	1500/500	AVDD-40/4	1,0	160	400

То же, но для регулировки при постоянной мощности

RG = 1/1,85/4	1,85	1500/600	AVDD 15/4	0,75	80	300
RG = 3/3,65/4	3,65	1500/600	AVDD 30/4	1,0	160	370

ТАБЛИЦА 133.

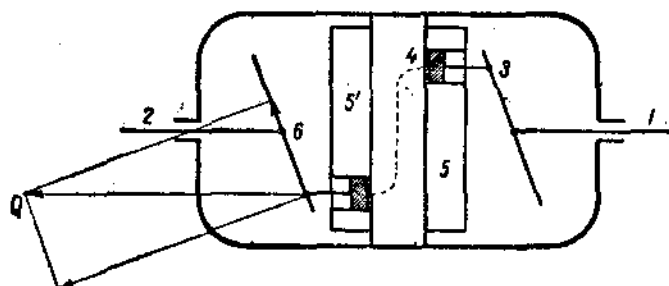
Размеры передач AEG, тип RG-3/3,65/4.

Тип	a	b	c	d	e	f	g	h	k	l	o	p	g	s	t	u	w
RG-1,85/4	245	230	22	35	285	280	280	160	588	90	310	325	278	14	38,	8	23
RG-3/3,65/4	260	265	35	42	320	330	325	200	720	105	338	415	382	35	45,5	12	23

6) Наконец, нельзя не упомянуть здесь о так называемых гидравлических (масляных) передачах. Существует очень большое количество конструкций таких передач, позволяющих не только плавно и в широких пределах регулировать число оборотов приводного вала, но и реверсировать его. В этом отношении гидравлические муфты, по мнению многих специалистов машиностроения, являются весьма серьезным конкурентом электрическому двигателю.

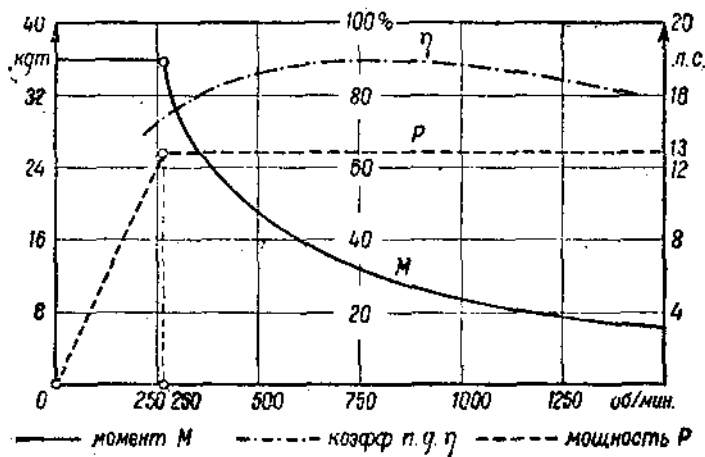
На фиг. 442 схематически представлен принцип действия муфты Дженни. Вал I соединен с двигателем, имеющим постоянное число оборотов. На конце вала через посредство шарнира Гука укреплен диск 3 , в котором шарнирно укреплены своими концами несколько штоков, концентрически расположенных в теле 5 поршней 4 . Диск 3

может при помощи приспособления, не показанного на схеме, изменять свое положение по отношению к вертикальной плоскости. При вращении вала 1 и диска поршни будут перемещаться, причем за полуоборот диска поршень будет всасывать, а на втором полуобороте — нагнетать масло, заполняющее всю муфту.



Фиг. 442.

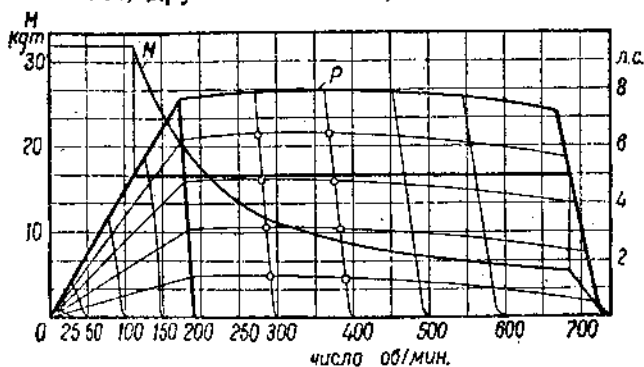
При изменении наклона диска, очевидно, изменяется и величина хода поршней. С другой стороны муфты, или даже отдельно от нее, имеется в точности такое же устройство, за исключением только того, что наклон диска 6 в этой части установлен жестко, и диск может вращаться только около горизонтальной оси (вала 2). Нагнетаемое поршнем 4 масло переходит по особым каналам рас-



Фиг. 443 а.

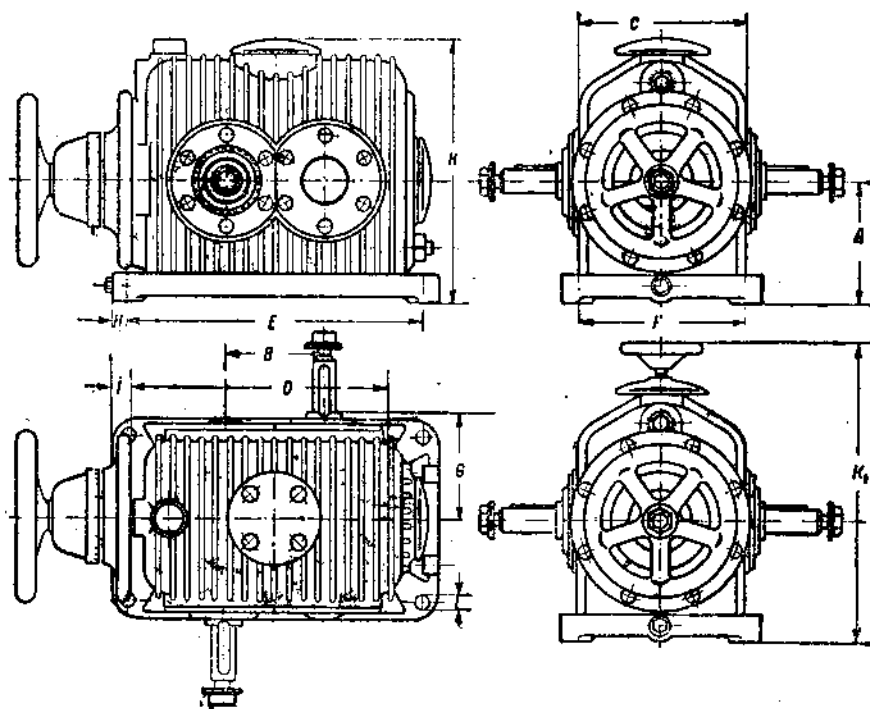
пределителя, не показанного на схеме, к соответственному поршню тела 5' и производит давление на диск 6, причем усилие раскладывается на два взаимно-перпендикулярных усилия, из которых одно уничтожается в опорных подшипниках, а другое заставляет вращаться диск 6, так как точки приложения этого усилия близки к периферии диска. Диск левой части муфты связан шарниром Гука с приводным валом 2. Число оборотов этого диска всецело зависит

от скорости перемещения поршня, т. е. от быстроты нагнетания или всасывания масла; другими словами, чем меньше масла будет по-



Фиг. 443 в.

ступать в единицу времени из цилиндров правой части, тем меньше его будет попадать в левую часть, и, следовательно, тем медленнее будет вращение вала 2. Регулирование притока масла производится



Фиг. 444.

наклоном правого диска 3, и, например, при вертикальном его положении (параллельном диску 5) поршни остаются на месте, и вал 2 неподвижен. Если диск 3 правой части будет наклонен в другую сторону, то соответственно изменится направление вращения вала 2.

Характеристики гидравлических муфт усовершенствованной конструкции Lauf-Thoma Магдебургского завода типа NLT-160 для мощности 13 л. с. в пределах 260—1500 об/мин представлены на фиг. 443а. Коэффициент полезного действия колеблется от 0,7 до 0,9, но при скорости ниже 250 об/мин резко идет к нулю. Наименьшая модель муфты Lauf-Thoma типа NLT-80-A-I для передачи момента $M=10 \text{ kgm}$ (длительно) и $M=18 \text{ kgm}$ (кратковременно) при 40 об/мин на ведомом валу и 1000 об/мин на ведущем ($u=25$) стоит 2500 германских марок, т. е. значительно дороже регулируемого двигателя.

Гидравлические муфты фирмы Fortuna-Werke в Штутгарте двух типов: Епог-JV (с отдельными мотором и насосом) и Епог-D (комплектно) обладают характеристиками, показанными на фиг. 443б.

Данные о габаритах, мощности и передаточном числе приведены в табл. 134 для типа JV и в табл. 135 для типа D, согласно обозначениям на фиг. 444.

ТАБЛИЦА 134.

Величина №	00		0		1		2		3	
Число об/мин на ведущем валу .	1800		1650		1500		1300		1100	
Число об/мин на ведомом валу .	170	1200	165	1120	155	1050	145	960	125	820
Мощность (норм.) в л. с.	0,15	0,65	0,3	1,2	0,5	2,0	0,8	3,2	1,2	5,0
Момент (максим.) в kgm	120	75	200	125	320	200	560	350	950	600
Расстояние В . .	84,37		89,25		105,12		125,55		144	

ТАБЛИЦА 135.

Величина №	00	0	1	2	3	4	5	6
Нормальная мощность в л. с. .	0,65	1,2	2,0	3,2	5,0	7,5	11,0	15,0
Максимальная мощность . . .	1,0	1,8	2,8	4,5	7,0	10	14	20
Число об/мин на ведущем валу	1800	1600	1500	1300	1100	900	750	650
То же (макс.) на ведомом валу	1200	1100	1000	850	750	620	520	450
Высота оси А mm	105	120	140	160	185	215	250	295
Между осями валов В mm . . .	150	175	205	235	265	315	365	430
Ширина С mm	160	175	200	225	260	295	340	390
Длина D mm	295	340	395	455	525	615	715	840
Между болтами E mm	250	295	310	400	460	540	640	765
То же F mm	185	200	235	260	300	345	390	445
Общая высота К mm	130	150	170	195	225	260	300	350
Диаметр вала ведущего mm . .	16	20	25	30	35	40	45	50
То же ведомого mm	25	30	35	40	45	50	60	70

Стоимость типов JV-2 и JV-3 для мощности 3,2 л. с. и 5 л. с. соответственно 2100 и 2470 германских марок. Мощность постоянна в пределах регулировки $\mathfrak{R}=5$. При регулировании выше этого предела мощность соответственно падает. Стоимость муфты типа D-3 мощностью 5 л. с. значительно ниже, а именно 1650 германских марок.

Упорная работа над усовершенствованием конструкции муфт вызвала расширение области их применения даже для длительной работы, в частности металлостанков.

По данным M. Süberkrüb стоимость мощных муфт для автотранспорта упала до 80—40 марок за силу при мощности от 200 до 1800 л. с. против стоимости коробок зубчатых переборов 42 марки за 1 л. с.

Имея в виду растущую скорость резания и неуклонное приближение двигателя к резцу едва ли есть основание сомневаться в развитии применения электрической регулировки к станкам.

§ 5. Непосредственное соединение.

Непосредственное соединение, требующее прежде всего одинаковой скорости вращения машины-орудия и двигателя, конечно, является наиболее желательной формой соединения их, так как обладает к. п. д. в 100% при минимуме занимаемого места.

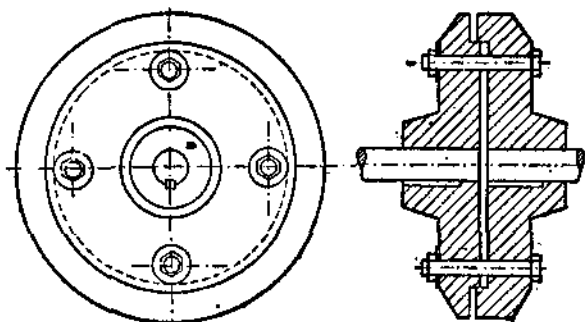
Задача электрификатора—проводить его где только можно, вплоть до переоборудования и даже, при известных условиях, добиваться замены устаревших машин-орудий, на том принципе, что быстроходные машины и двигатели легче, дешевле, и экономичнее тихоходных при той же производительности.

Однако только определенная категория машин может быть соединена таким образом, а именно быстроходные: вентиляторы, эксгаустеры, центробежные насосы, центрофуги, быстроходные по преимуществу деревообделочные машины, пыльные волчки в трепальном отделе прядильных фабрик; из металлообрабатывающих: дисковые пилы, шлифовальные, сверлильные станки и т. п.

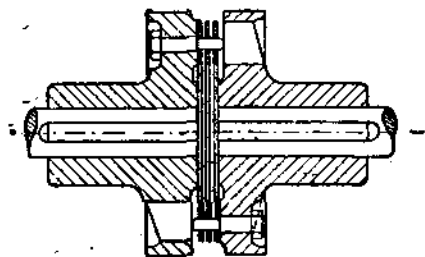
а) При спокойной, безударной нагрузке непосредственное соединение достигается помощью жесткой муфты (фиг. 445). Однако эта муфта требует очень точной пригонки валов и применяется лишь при общей фундаментной плите.

б) Для смягчения ударов и последствий плохой центрировки валов пользуются эластичными муфтами.

Во всех муфтах этого типа эластичность достигается за счет промежуточного тела между обеими половинками муфт — ремня или резины. Так, фирма Сименс-Шуккерт (фиг. 446) создает эластичность

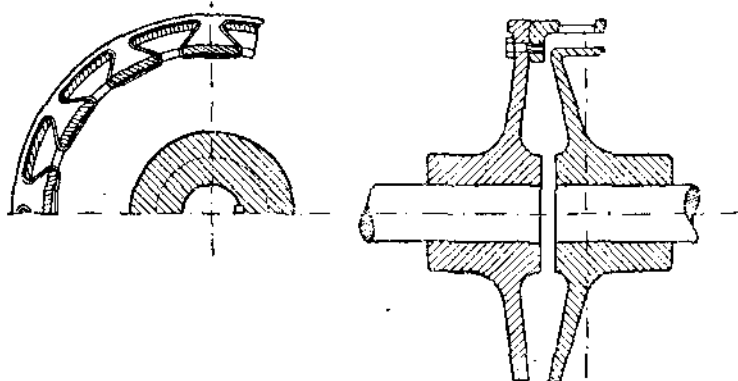


Фиг. 445.

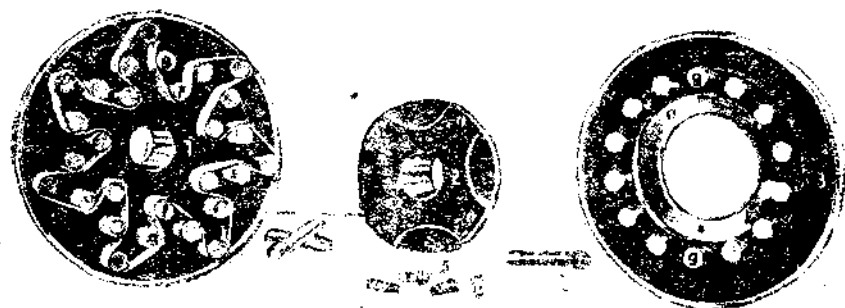


Фиг. 446.

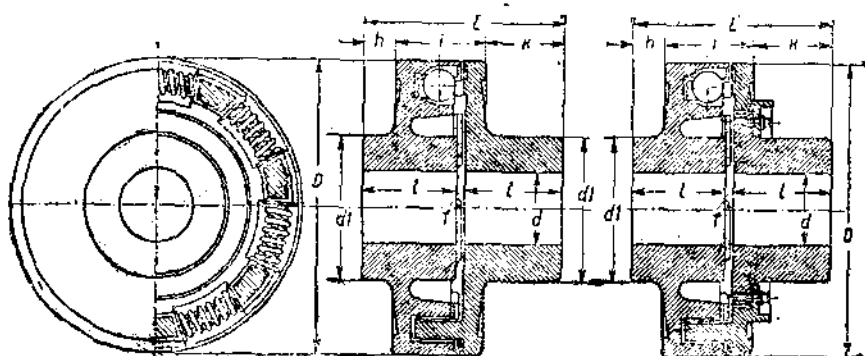
за счет толстых кожаных прокладок, фирма Voith (фиг. 447)—за счет зигзагообразно проложенного ремня.



Фиг. 447.



Фиг. 448.



Фиг. 449.

Подобно фирме Voith, выполняет эластичные муфты германская фирма Wülfel (фиг. 448). Вследствие особенности распределения зигзагов ремня муфта Wülfel обладает чрезвычайно большой эластичностью, что делает ее очень удобной при разного рода монтажах.

Фирма Luth & Rosen (Bergmann, „Mitt.“, 1927, Н. 1) и фирма SSW пользуются для соединения эластичных муфт стальными пружинами (фиг. 449). Несмотря на большие удобства, по опытам некоторых фирм при работе подобных муфт наблюдалось явление резонанса, что делает нежелательным применение стальных пружин в качестве эластичного тела.

Весьма распространено применение резиновых втулок на соединительных болтах.

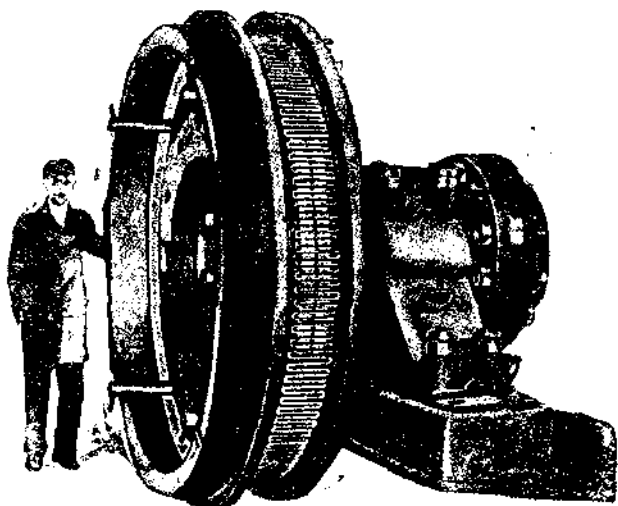
На фиг. 450 представлена муфта Vibbu, широко распространенная для прокатных станов.

Зигзагообразная стальная лента охватывает обе половинки муфты по периферии.

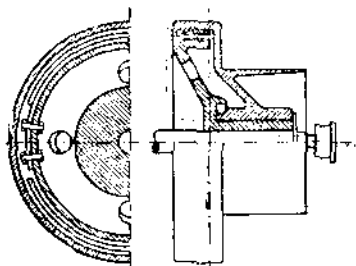
в) Если выбранный двигатель не обладает достаточным начальным моментом для преодоления сопротивления инерции привода, например однофазный асинхронный (и отчасти трехфазный короткозамкнутый в случае пуска с понижением напряжения), то при непосредственном соединении машин небольших мощностей до 20 kW можно применить центробежную муфту, автоматически захватывающую приводный вал после достижения определенной скорости вращения.

Практика электромоторного привода выработала целый ряд самых разнообразных по своей конструкции центробежных муфт. Наиболее простой из них является центробежная ременная муфта фиг. 451. По окружности внутреннего шкива (моторной половинки муфты) расположены два двойных ремня, каждый из которых занимает немного менее полуокружности; одним концом эти ремни прикреплены к шкиву. На фиг. 451 (слева) видно прикрепление

одного из двойных ремней, причем вращение должно происходить в данном случае против часовой стрелки. По достижении определенного числа оборотов оба свободных конца ремней *K* прижимаются центробежной силой, пропорциональной числу оборотов двигателя, к ободу той половинки муфты, которая заклинена на валу машины-орудия или имеет в свою очередь ведущий шкив, как показано на чертеже.



Фиг. 450.



Фиг. 451.

Приведем весьма простой расчет такой муфты:

Пусть D — среднее значение диаметра ремней в м (диаметр шкива $+\delta$), b — ширина ремней в м, δ — толщина двух ремней в м, γ — удельный вес ремня, μ — коэффициент трения.

Тогда вес ремней $G = 1000 \cdot \pi \cdot D \cdot b \cdot \delta \cdot \gamma$ kg.

Периферическая скорость $v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$ м/сек.

Касательная сила F_t на плече $\frac{D}{2}$ определится из уравнения:

$$P \cdot 102 = F_t \cdot v$$

(где P — передаваемая мощность в kW).

Для сцепления необходимо, чтобы центробежная сила F_c , умноженная на коэффициент трения μ , была равна тангенциальной силе, т. е. $F_c \cdot \mu = F_t$.

$$\text{Передаваемая мощность: } P = \frac{F_t \cdot v}{102} = \frac{F_c \cdot \mu \cdot v}{102}; \quad \text{но } F_c = \frac{G \cdot v^2}{g \cdot \frac{D}{2}};$$

следовательно,

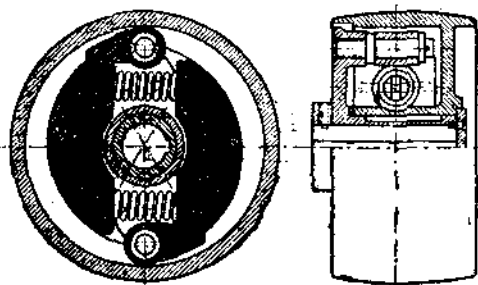
$$P = \frac{G \cdot v^3 \cdot \mu \cdot 2}{102 \cdot g \cdot D} = \frac{1000 \cdot \pi \cdot D \cdot b \cdot \delta \cdot \gamma \cdot v^3 \cdot \mu \cdot 2}{102 \cdot g \cdot D}. \quad (313)$$

Заменяя скорость v выражением $\frac{\pi D n}{60}$, получим

$$P = \frac{2000 \cdot \pi^4 \cdot D^3 \cdot n^3 \cdot b \cdot \delta \cdot \gamma}{102 \cdot 60^3 \cdot g} = k \cdot D^3 \cdot n^3 \cdot b \cdot \delta \cdot \gamma, \quad (313')$$

т. е. P пропорционально кубу D и n . (Коэффициент $k \cong 0,001$.)

Очень распространенной является центробежная муфта конструкции фирмы Сименс-Шуккерт (фиг. 452, каталог 1925 г., стр. 77), действие которой ясно из чертежа.



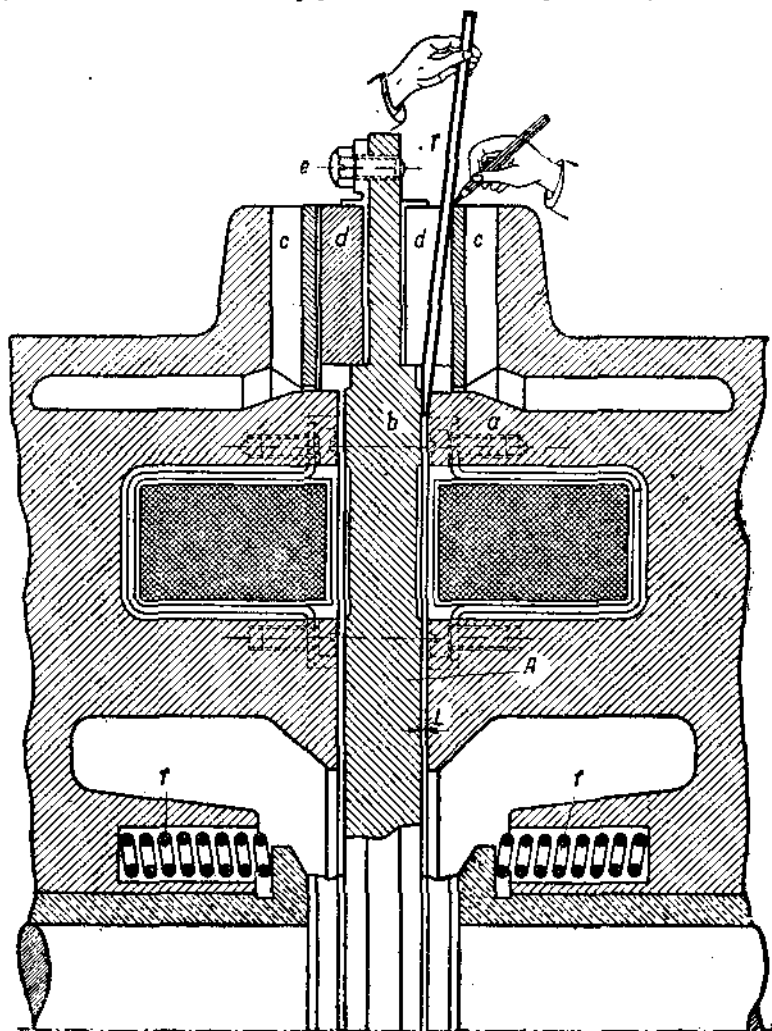
Фиг. 452.

К этой же категории можно причислить коническую муфту. Однако сцепление здесь не автоматическое, а производится в нужный момент нажатием от руки или помощью механизма. При больших моментах вращения вследствие значительного поверхностного давления, наблюдается сильный износ этих муфт.

Наконец, для случаев, аналогичных предыдущим, и в целях особой плавности трогания с места применяются электромагнитные муфты.

Подобные двоянные муфты получили широкое применение в электроприводах, требующих частых реверсов, как, например, в продольно-строгальных станках, шлифовальных и т. п.

Их преимущество заключается главным образом в простоте всего устройства и экономичности, причем последняя объясняется возможностью применения быстроходных двигателей переменного тока. Для питания самой муфты в таких случаях применяют не-



Фиг. 453.

большие преобразователи мощностью до 0,5 kW для привода станков мощностью до 30—40 kW.

Конструктивное оформление реверсивной электромагнитной муфты видно из фиг. 453.

Вал, предназначенный для реверсирования, несет жестко с ним соединенный металлический диск А, по обе стороны которого располагаются две муфты, несущие катушки. Муфты вращаются в разные стороны и в необходимых случаях с разным числом оборотов. На периферии диска А укреплены два кольца d, служащие для осуществления сцепления диска трением с той или иной муфтой

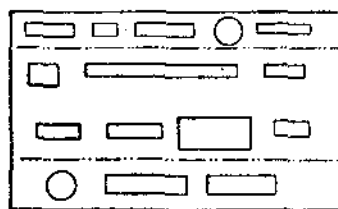
при пропускании электрического тока в правую или левую катушку. Соприкосновения между муфтами и телом диска в части, близкой к катушкам, не должно быть во избежание перегрева последних и устранения действия остаточного магнетизма. Обратный отход муфты от колец d производится под действием пружин f . Для правильного функционирования муфты необходимо время от времени проверять размеры зазора между телом диска и муфтой. Нормально величина этого зазора колеблется в пределах 1—2 мм в зависимости от мощности муфты. Проверка воздушного зазора производится с помощью щупа со скошенным концом.

Так как угол заострения щупа около 6° , т. е. соотношение толщины щупа к высоте заострения равно 1:10, то, следовательно, при углублении щупа в зазор на некоторую величину, определяемую расстоянием между отметками, как это указано на фиг. 453, зазор будет равен $1/10$ величины углубления щупа.

§ 6. Групповой и одиночный приводы.

Вернемся к энергетическому сравнению вариантов приводов и составим эскизы их оборудования. Возьмем сначала случай группового привода.

На фиг. 454 представлен план электрифицируемой мастерской, где взаимное расположение станков большей частью оказывается



Фиг. 454.

заданным технологическим ходом обрабатываемого фабриката, и в распоряжении электрика могут быть разве только мелкие передвижения, главным образом поворот их перпендикулярно или параллельно продольной оси здания.

При групповом приводе установка станков жестко определяется параллельностью трансмиссионному валу*).

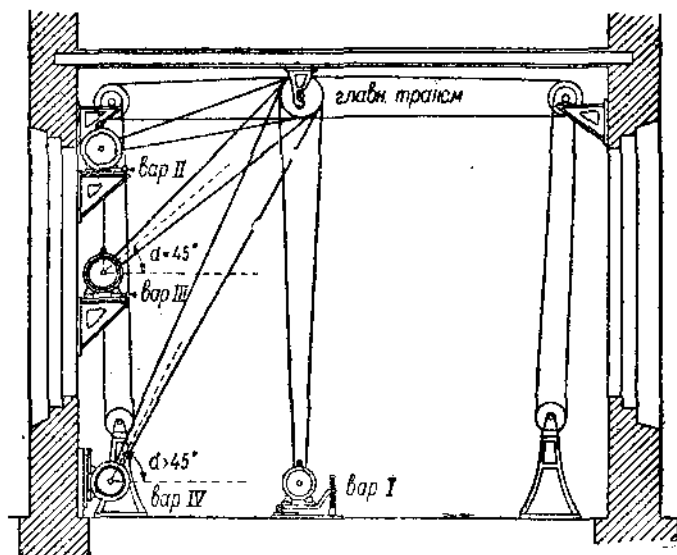
Прежде всего намечается расположение главных трансмиссионных валов (см. пункт на фиг. 454) таким образом, чтобы по возможности выполнить существенное условие для минимума потерь в опорах—уравновешенность вала. При этом контрприводы должны расположиться по обе стороны его. Однако это не всегда удается из-за расположения электродвигателей и необходимости соблюсти требуемые расстояния между осями.

Действительно, при центральной установке трансмиссионного вала над проходом между станками двигатель может быть установлен либо в конце прохода, т. е. у поперечной стены на качающихся салазках для правильного натяжения ремня (фиг. 455—вариант I) либо на кронштейне у продольной стены (вариант II) или непосредственно на стене (вариант IV). Вариант III—на стене с наклоном ремня под 45° нежелателен вследствие затруднительности поддерживать правильное натяжение ремня.

Выносить двигатель на конец вала не рекомендуется в виду увеличения скручивающих усилий и, следовательно, диаметра вала

* При ином расположении к. п. д. ременной передачи ухудшается.

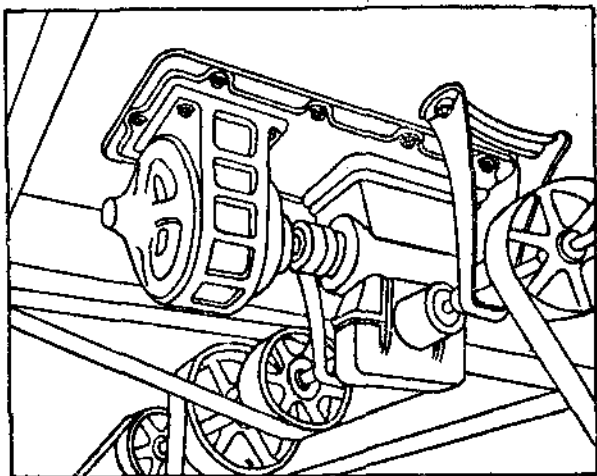
(желательно центральное положение двигателя), а установка двигателя на кронштейнах на высоте весьма затрудняет надзор за ними.



Фиг. 455.

Нередко приходится мириться с установкой трансмиссионного вала у стены и двигателя под ним; в этом случае необходимо учесть одностороннее давление при подсчете потерь в опорах.

Иногда по соображениям места предпочтительнее оказывается цепная, зубчатая или даже червячная передача (фиг. 456). Последние две имеют, впрочем, тот недостаток, что все оборудование, выполняемое солидно во избежание перекоса и, следовательно, тяжелое, приходится подвешивать к потолку, и двигатель оказывается трудно доступен для ухода.



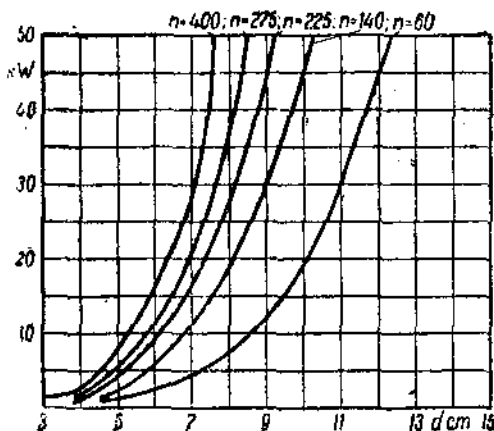
Фиг. 456.

При переоборудовании следует избегать весьма распространенных трех- и четырехступенчатых передач не только по экономическим соображениям, но и в виду крайнего затемнения помещения.

Для определения мощности группового двигателя необходимо, кроме полезной мощности, учесть потери в трансмиссии и станках.

Зная длину трансмиссионного вала и принимая предварительно его диаметр по кривым фиг. 457 (соответственно числу оборотов и передаваемой мощности), можно определить расстояние между опорными подшипниками по формуле

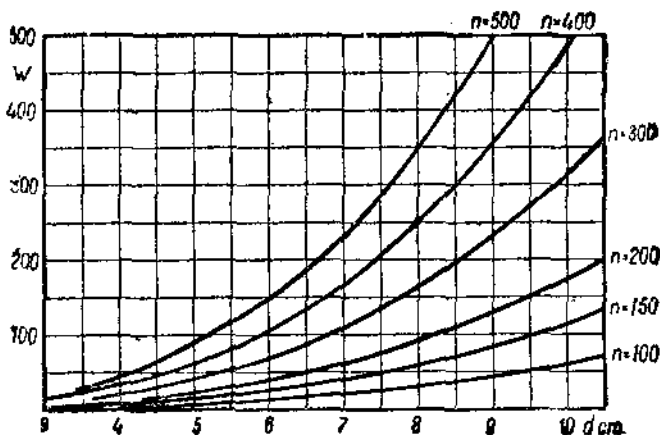
$$l_{\max} = 125 \sqrt{d} \text{ или } l_{\min} = 135 \sqrt[3]{d} \text{ см.}$$



Фиг. 457.

Инж. Schönwald предлагает определять потери в подшипниках трансмиссионного вала по формуле

$$W = 0,256 \cdot d^3 n^2 (\bar{F}_R + \bar{F}_p) 10^{-5} \text{ W,} \quad (314'')$$



Фиг. 458 а.

*) Подсчет потерь в опорах вала большею частью не производится в предварительных расчетах, так как эти потери входят в приведенные выше средние значения к. п. д. двух- и трехступенчатых ременных передач, полученные инж. Гартманом.

Только при сохранении старых, длинных трансмиссионных приводов осторожнее будет произвести этот подсчет отдельно, принимая в таком случае к. п. д. ременной связи 0,92—0,94, а потери в опоре вычислять добавочно, учитывая перекосы, осадки, одностороннее давление и пр.

где $(F_R + F_p)$ — геометрическая сумма усилий, приходящихся на один подшипник от натяжения ремня F_R и от веса вала, шкивов и муфт F_p .

На основании этой формулы составлены кривые (фиг. 458а) потерь в одном подшипнике для различных диаметров и оборотов вала.

Инж. Schönwald приводит целый ряд практических данных для определения потерь в отдельных ремнях, считая потери пропорциональными ширине ремня.

В табл. 136 приведены значения указанных потерь.

ТАБЛИЦА 136.

Ширина ремня в см	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	10	11	12	15	20	25	30
Потери на ремень в ваттах	34	38	42	46	50	54	58	62	66	70	74	78	82	90	93	106	130	170	210	250

ТАБЛИЦА 137.

Сравнение потерь в ваттах на 1 подшипник, полученных из опыта и по формуле (315).

Диаметр вала в см	Число оборотов вала в 1 минуту							
	100		150		200		250	
	опыт	формула	опыт	формула	опыт	формула	опыт	формула
4		9,75		14,5		19,5		24,5
4,5		13,5		20,0	29,0	26,5		33,5
5	28,0	18,0	44,0	27,5		36,5		45,2
5,5		23,5		35,5	42,0	46,8	74,0	58,5
6		30,5	23,0	45,2		60,5		75,5
6,5	43,0	38,0	61,0	56,5	53	75,5	94,0	94,5
7		46,0	48,0	69,5	48	92,5	74,0	116,0
7,5	68,0	55,5	108,0	83,0	138,0	111,0	82,0	138,0
8		67,0	106,0	101,0	135,0	135,0	174,0	168,0
8,5		80,0		120,5		164,0	226,0	200,0
9		93,5		140,0		187,0	188,0	234,0

В заключение в табл. 137 приведены средние потери, приходящиеся на подшипник, полученные из опытов, проведенных автором на целом ряде крупных заводов СССР. Однако достоверность их далеко не одинакова, так как, во-первых, некоторые получены из 2—3 измерений, другие из более солидного числа измерений; во-вторых, и качество монтажа трансмиссий оказалось далеко не одинаковым. Анализ кривых, построенных на фиг. 458b приблизительно (по опытным точкам) и выражающих зависимость потерь от диаметра и числа оборотов трансмиссионного вала, позволяет представить ее формулой:

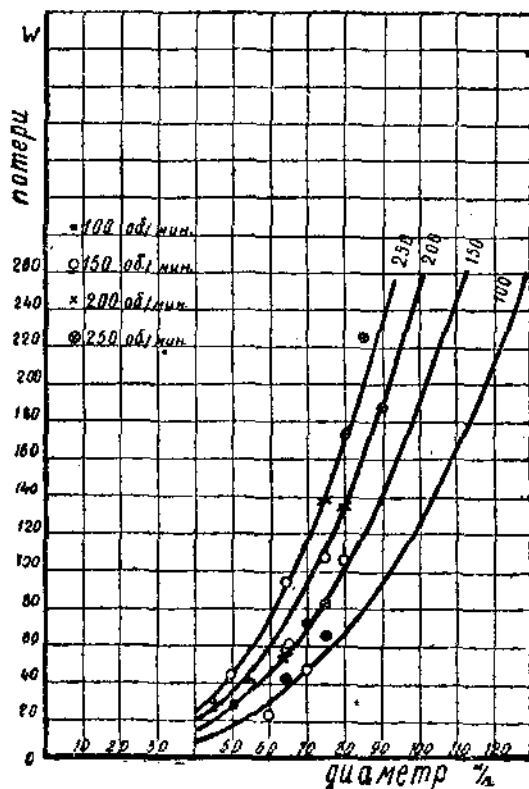
$$W = 3 \cdot n \cdot d^{2,8} \cdot 10^{-6} \text{ kW} \quad (315)$$

или, округляя степень, формулой:

$$W = 1,6 \cdot n \cdot d^3 \cdot 10^{-6} \text{ kW} \quad (315')$$

Как видно из табл. 137 и фиг. 458-б, некоторые отдельные цифры значительно отклоняются от подмеченной закономерности, что объясняется указанными выше причинами.

Учитывая, что цифры опыта получены как средние из 60 измерений, причем к первой графе табл. 137 были отнесены данные о трансмиссиях, имеющих от 90 до 122 об/мин, ко второй — от 140 до 174 об/мин, к третьей 180—220 об/мин, к четвертой 242—274 об/мин, надо признать коэффициенты, принятые в формулах (315) и (315'), отвечающими средним практическим значениям.



Фиг. 458 б.

Кроме полученной зависимости потерь в подшипниках трансмиссионного вала от числа оборотов и диаметра его, на фиг. 459 представлена зависимость этих потерь от средней мощности станков (менее явно выраженная) и кроме того зависимость потерь на 1 контрпривод от средней мощности станка, полученная из обследований главным образом металлопромышленности.

Далее намечается тип передачи от станка к трансмиссионному валу

или от контрприводного вала, если такой имеется при станке, для реверсирования или остановки.

Заданным является число оборотов станка или контрприводного вала n_s , но и число оборотов трансмиссионного вала n_t не может быть произвольным.

Хотя увеличение его и дает такие преимущества, как:

а) уменьшение диаметра вала и, следовательно, веса и стоимости;

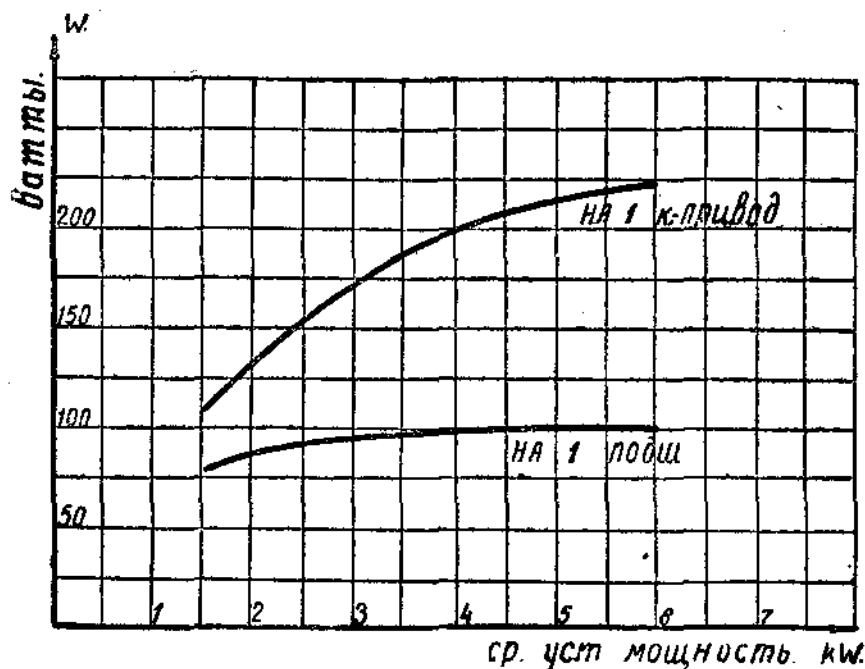
б) уменьшение и удешевление подшипников;

с) уменьшение диаметра шкивов и, следовательно, их веса и стоимости;

д) возможность применения деревянных шкивов при большом n_t ;

е) возможность применения быстроходного, дешевого и экономичного двигателя, —

все же, с другой стороны, при увеличении n_{tr} все обычные дефекты трансмиссии как осадка опор, плохая центровка и т. д., становятся значительно более чувствительными. В этом отношении малые группы с короткими валами чрезвычайно желательны.



Фиг. 459.

Нормально n_{tr} принимается от 150 до 250 об/мин, но не выходит из пределов 60—400 об/мин.

Соответственно выбранному передаточному числу $u = \frac{n_{tr}}{n_w}$ выбирается тип механической передачи, хотя по сказанным соображениям большею частью берется ременная передача.

Диаметр трансмиссионного шкива или шкива контрпривода определяется известным отношением

$$D_{tr} = \frac{D_w \cdot n_w}{(1 + \epsilon) \cdot n_{tr}},$$

где ϵ — скольжение ремня, обычно принимаемое равным 3% (при канатной передаче — 2%, при сталеленточной — 0,5% — 1%), D_w — диаметр шкива у станка.

Тот же подсчет повторяется по отношению к передаче от контрпривода к трансмиссионному валу и от последнего к двигателю.

Передаточный коэффициент и определяют, исходя от числа оборотов вала и подбирая число оборотов двигателя из соображения, что быстроходный двигатель легче, дешевле и экономичнее. Часто подсчет показывает, что экономия оправдывает применение лишний передачи (встроенной, типа фиг. 270).

Во всяком случае, при выборе диаметра шкивов, приходится идти либо в сторону увеличения шкива на трансмиссионном валу, либо в сторону уменьшения шкива двигателя. И то и другое ограничено: первое — утяжелением трансмиссии и иногда недостатком места (малое расстояние до потолка), второе — увеличением усилий на валу двигателя, которое за известным пределом требует конструктивного изменения, т. е. усиления вала, подшипника и т. д. (пример в главе V).

Совершенно аналогично составляются параллельные варианты группового привода с другим количеством станков в группе (большим или меньшим); далее — вариант чисто одиночного привода и, наконец, смешанного привода с выделением на одиночный привод станков, резко отличающихся по типу и режиму работы.

Составление двух последних вариантов может отличаться от вышеизложенного только другим характером применяемых передач, а главное, методом определения мощности двигателей, о чем будет сказано далее.

При одиночном приводе первой заботой является проведение, где только возможно, непосредственного соединения.

Механические приспособления для реверсирования и остановки станков отпадают, а с ними зачастую и контрприводы. Всюду, где возможно, ременная передача заменяется более компактной.

§ 7. Подсчет мощности электродвигателей.

Следующей стадией составления вариантов приводов после выбора передач является определение мощности электродвигателей.

При изложении способов определения будем различать способы, применяемые при электрификации существующих фабрик и заводов, от тех, которые применяются при проектировании их вновь.

1) В первом случае, при переходе от существующего механического распределения энергии, очень удобным оказывается так называемый индикаторный способ, но применяется он только для определения мощности групповых электродвигателей, после разбивки всех станков на группы. Точность этого способа невелика.

Снятие индикаторных диаграмм всегда оказывается возможным, так как при механическом приводе применяется исключительно машина поршневого типа, т. е. дизель или паровая машина. Турбина здесь неприменима по своей быстроходности.

Если при холостом ходе машины, имеющей площадь поршня q см², ход поршня L м и число оборотов n_0 об/мин, а индикатор-

ное давление оказывается равным p_0 , то мощность, затрачиваемая на вращение машины, как сумма мощности всех рабочих цилиндров

$$P_0 = \sum \frac{p_0 \cdot q \cdot L \cdot n_0}{75 \cdot 60} \text{ инд. л. с.} \quad (316)$$

(для четырехтактного двигателя вместо n_0 вводится $\frac{n_0}{2}$).

Накидывая ремень на шкив трансмиссии (без станков) и замечая новые значения индикаторного давления p_n и оборотов n_n , определяем из разности $P_n - P_0$ мощность, соответствующую потерям в трансмиссии.

Включая постепенно отдельные группы станков без нагрузки, получаем таким же путем потери в них и, наконец, при нормальной работе — полезную мощность, идущую на процесс обработки.

Конечно, группы станков не могут быть малыми по отношению к мощности машины, иначе способ становится недопустимо неточным.

Такие испытания должны вестись длительно (1—2 недели), чтобы можно было подметить закономерность в изменении режима работы, если она существует, а также по возможности выделить в особые группы станки, работающие преимущественно в ночную смену или сверхурочно, и определить их мощность.

Таким образом, выразив все полученные индикаторные мощности в эффективных силах и затем в киловаттах, определим мощность отдельных групповых электродвигателей путем деления полученной мощности на к. п. д. той передачи, которая будет соединять его с трансмиссией:

$$P_m = \frac{P}{\eta}.$$

Если же вводятся какие-либо изменения в передаче от станков к трансмиссионному валу, то мощность двигателя получится делением определенной таким же путем мощности станков на к. п. д. намеченных передач.

Надо заметить, что при окончательном подсчете групповых электродвигателей необходимо учесть возможность развития тех или других цехов данного предприятия в связи с его переоборудованием, приняв во внимание свободные места в мастерских для установки новых станков. Однако такое увеличение мощности двигателей может быть рассчитано лишь на немедленное расширение, а не „в запас“; иначе продолжительная работа их при неполной нагрузке будет невыгодной.

Для определения мощности одиночного привода, по крайней мере мелких станков, индикаторный способ непригоден.

Для этого может быть применен способ калиброванного двигателя, включаемого летучими проводами в сеть хотя бы электрического освещения, имеющегося на всяком заводе. Калиброванный электродвигатель (т. е. имеющий точно определенную характеристику), лучше всего шунтовой постоянного тока с широкой регулировкой оборотов и со ступенчатым шкивом для подбора подходящей скорости, устанавливается с салазками на временной дере-

ванной раме и соединяется ремнем с испытуемым станком или со шкивом контрпривода, если таковой сохраняется.

Пишущий ваттметр (или амперметр при постоянном токе если $V = \text{const}$) дает суточную диаграмму нагрузки, из которой и можно определить как необходимую среднюю *) мощность двигателя, так и пики нагрузки, служащие для окончательной проверки выбора мощности и типа двигателя.

Если необходимо проверить этим способом мощность на валу станка, то таковая определяется в киловаттах следующим образом:

$$P_v = \frac{i_{\text{mit}} \cdot V}{1000} \eta_n;$$

здесь i_{mit} — средняя сила постоянного тока,

η_n — к. п. д. ременной передачи.

Такие диаграммы, вместе с диаграммой числа оборотов, особенно полезны для расчета маховиков при неравномерной нагрузке, например в случае одиночного привода молотов, штампов, мюльселекторов, пил, а главное, крупных прокатных станков, шахтных подъемников и т. п.

Следует упомянуть еще об одном способе определения мощности станков — по ширине шкива B , считая, что ширина ремня $b = 0,9B$:

$$P = \frac{p \cdot b \cdot \pi \cdot D_w \cdot n_w}{60 \cdot 102} \text{ kW}, \quad (317)$$

где p — усилие, передаваемое 1 см ширины ремня (kg); для предварительных подсчетов усилие p берется обычно равным 8—10 kg на 1 см ширины ремня;

b — ширина ремня (см);

D_w — диаметр шкива станка (m);

n_w — число об/мин приводного шкива станка.

Формула дает весьма приблизительный результат, но очень удобна по своей простоте.

2) При проектировании электропривода вновь строящихся фабрик и заводов дело определения мощности гораздо затруднительнее. Правда, мощность машин-орудий, производящих передвижение масс воды, воздуха, грузов (как, например, насосы, вентиляторы, подъемники), может быть вычислена аналитически, а если работа прерывистая и известен режим ее, то может быть введена и поправка по одному из способов главы VI.

Приведем некоторые формулы для аналитического подсчета мощности. **)

Если Q — количество воды, подаваемой электронасосами в 1 час в m^3 , H — высота подъема в метрах, причем $H = H_1 + H_2 + h_s$, где H_1 — высота всасывания, H_2 — высота нагнетания, h_s — высота,

*) В данном случае (предварительных подсчетов) — простым проведением средней линии, а более точно — любым из способов, изложенных в главе VI, с учетом охлаждения в перерывах.

**) В виду того, что электрификация насосных, вентиляторных (особенно регулируемых, шахтных) и подъемных установок представляет три крупных отдела специального курса, ограничимся здесь указанием приблизительного значения коэффициентов.

эквивалентная гидравлическим потерям в трубопроводах; γ — вес 1 м³ жидкости (для воды $\gamma = 1000$ кг), то мощность электродвигателя будет:

$$P = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H}{102 \cdot 3600 \cdot \eta_p \cdot \eta_u}, \quad (318)$$

причем η_p — к. п. д. насоса, принимаемый в зависимости от мощности для центробежного насоса высокого давления равным 0,55—0,75, а для насоса низкого давления 0,2—0,6; для поршневого насоса — 0,85—0,9; η_u — к. п. д. передачи (при непосредственном соединении равный единице).

Для электроventильаторов мощность определяется по формуле

$$P = \frac{q \cdot h}{102 \cdot \eta_v \cdot \eta_u} \text{ kW}, \quad (319)$$

где q — количество воздуха в м³/сек; h — депрессия в мм водяного столба (для шахтного ventильатора $h = \frac{0,38 \cdot q}{a}$, где a — эквивалентное сечение шахты в м); η_v — к. п. д. ventильатора, принимаемый для комнатных ventильаторов 0,2—0,3, для средних эксгаустеров 0,4—0,55, для больших шахтных ventильаторов 0,80—0,83.

ТАБЛИЦА 138.
Ventильаторы типа Сирокко для фабрик и заводов.

Количество воздуха в м ³ /мин	Мощность в kW при депрессии мм вод. столба					
	40	50	60	80	90	100
25	0,40	0,59	0,6	0,9	—	—
45	0,75	0,95	1,0	1,45	1,7	—
80	1,25	1,65	1,90	2,5	2,9	3,0
105	1,70	2,20	2,30	3,0	3,1	3,7
150	2,4	2,7	2,85	4,1	4,7	6,3
210	2,7	4,1	4,2	5,4	6,4	7,0
260	3,4	4,4	4,6	6,6	7,5	8,1
360	4,7	5,6	6,9	9,5	10,0	11,5
460	6,2	8,1	9,0	11,0	12,0	14,0
750	12,5	15,5	15,0	17,5	23,0	27,0
1000	13,5	18,5	20,0	25,0	29,0	31,0

ТАБЛИЦА 139.
Воздуходувки для мартеновских печей и вагранок.

Количество воздуха в м ³ /сек.	0,18	0,3	0,4	0,5	0,75	0,90	1,2	1,8	2,6	3,2	4,0	5,0
Давление в мм вод. столба	350	350	400	400	450	500	500	550	550	600	600	650
Число об/мин	2 800	2 600	2 750	2 850	2 650	2 850	2 910	2 910	2 630	2 580	2 760	2 400
Потребная мощность в kW	1,4	2,1	2,8	3,4	5,2	6,8	8,4	14,4	17,8	28,2	41	52

Наконец, для подъемных механизмов мощность двигателя при установившемся движении, т. е. при постоянной скорости подъема:

$$P = \frac{G \cdot v}{102 \eta_m},$$

где η_m — к. п. д. подъемного механизма зависит от его конструкции и обычно дается для лебедки лифта $\eta_m = 0,25 - 0,4$ и крана $\eta_m = 0,5 - 0,8$; G — вес груза плюс вес крюка, цепи или клетки в лифте (в kg). Если имеется противовес, то его вес G_k вычитается из веса G .

Для двигателя, передвигающего тележку крана или самый мост, мощность определится по формуле:

$$P = \frac{G \cdot v (f + \mu \cdot r_s)}{102 \cdot r \cdot \eta_n} \text{ kW}, \quad (320)$$

где G — вес в kg тележки или моста с грузом; v — скорость передвижения в m/sec; f — коэффициент трения качения, равный 0,05—0,08; μ — коэффициент трения цапфы вала, равный 0,07—0,10; r_s — радиус цапфы (cm); r — радиус колеса (cm); η_n — к. п. д. передачи.

Влияние перекоса моста может быть учтено коэффициентом 1,25—1,30.

Добавочный момент или добавочная мощность, необходимая для преодоления инерции масс при пуске и увеличенного значения коэффициента трения, может быть совершенно точно подсчитана по формуле (11), приведенной в главе I:

$$M_s = \frac{GD^2n}{375 \cdot t_b} + 0,975 \frac{G_n \cdot v^2}{n \cdot t_b} \text{ kgm}.$$

Для предварительных подсчетов увеличение мощности при пуске может быть определено в 25—50% от мощности установившегося хода.

Перечисленными случаями и ограничивается категория машин, мощность которых может быть вычислена аналитически.

Для машин-орудий другой категории, так называемых „обрабатывающих“, необходимую мощность можно получить только на основании эмпирических данных.

Из этой последней категории для машин, работающих продолжительно и с равной нагрузкой, например большинства машин текстильной и бумажной промышленности, взаимосвязь мощности и производительности могла быть легко эмпирически установлена с достаточной для практических целей точностью.

Что же касается, например, металлообрабатывающих станков, то хотя эта связь также изучена, но в виду переменного по преимуществу режима работы мощности, получаемые помощью эмпирических формул, не могут быть признаны надежными.

Например, для определения мощности токарных станков часто применяют формулу

$$P = \frac{k \cdot v}{60 \cdot 102} \text{ kW} \quad (321)$$

где k — усилие резания в $\text{kg} = q \cdot k_s$; q — сечение стружки в mm^2 ; k_s — усилие резания, приходящееся на 1 mm^2 , или так называемый «коэффициент резания»; v — скорость резания в m/min .
 k_s может быть определен из табл. 140.

ТАБЛИЦА 140.

А в т о р	М а т е р и а л			
	Чугун	Мягкая сталь	Сталь	Твердый чугун
	в kg/mm^2			
Фишер	70—120	120—170	160—240	—
Никольсон	75—133	—	170—240	—
Твйдор	50—140	—	170—210	130

Значительные колебания k_s для одного и того же материала объясняются неоднородностью последнего, а кроме того весьма сильное влияние оказывают, как известно, величина и форма самой стружки.

Большой известностью пользуются также формулы Hartig'a, которые имеют общий вид для многих металлообрабатывающих станков, а именно

$$P = P_0 + p G, \quad (322)$$

где P_0 — мощность холостого хода станка в л. с.; G — вес снятой стружки в 1 час; p — мощность для снятия 1 kg в 1 час.

а) Для токарных станков:

при обработке чугуна $p = 0,069$,

„ „ железа $p = 0,072$,

„ „ стали $p = 0,104$,

$$P_0 = (0,1 - 0,7) \text{ л. с.}$$

б) Для сверлильных станков:

при обработке чугуна $p = 0,135 + \frac{0,135}{d}$,

„ „ железа $p = 0,135 + \frac{0,55}{d}$,

где d — диаметр сверла в mm ;

$$P_0 = 0,3 - 0,05 \text{ л. с.}$$

с) Для фрезерных станков:

при обработке чугуна $p = 0,07$,

при обработке твердого чугуна $p = 0,24$,

$$P_0 = 0,1 - 0,55 \text{ л. с.}$$

д) Для строгальных станков:

$$\text{при обработке чугуна } p = 0,034 + \frac{0,23}{q}$$

(q — сечение стружки в mm^2),

при обработке железа $p = 0,14$,

„ „ стали $p = 0,246$,

„ „ бронзы $p = 0,028$,

$$P_0 = 0,1 - 0,6 \text{ л. с.}$$

е) Для шлифовальных станков:

$$P = 0,0264 \cdot D \cdot v + \mu \frac{F \cdot v}{75} \text{ л. с.},$$

где F — давление на круг в kg , D — диаметр круга, v — окружная скорость круга, μ — коэффициент трения, равный для чугуна 0,22, стали 0,29, ковкого железа 0,44.

Необходимо оговориться, что формулы Hartig'a являются устаревшими для новейших станков, особенно в отношении мощностей холостого хода станков.

Таким образом впрямь до широкого распространения новых станков и новых методов обработки, когда благодаря облегченному управлению станки будут использованы полностью на всякой работе (см. далее о роли электрорегулирования), приходится признать не менее надежными те значения мощностей, которые дают в своих каталогах крупнейшие машиностроительные заводы на основании долголетнего опыта. Кроме того в каждом электротехническом справочнике можно найти таблицы мощностей, необходимых для различных станков, в зависимости от их размеров, составленные на основании каталогов машиностроительных фирм; однако пределы рекомендуемых мощностей слишком грубы, в силу чего целесообразнее пользоваться специальными справочниками, как, например, справочником металлста, „производственным“ Hütte и т. п.

В случае трансмиссионного электропривода можно мириться с неточностью способов подсчета мощности по таблицам на том основании, что ошибки в установлении мощности отдельных станков будут взаимно компенсироваться в группе. Действительно, мощность группового двигателя определяется по сумме мощностей станков и по двум коэффициентам: коэффициенту одновременности работы станков η_g (Gleichzeitigkeitsfaktor) и коэффициенту загрузки η_b (Belastungsfaktor).

Кроме того значительная живая сила вращающейся трансмиссии поможет двигателю преодолеть случайные пики нагрузки.

Приведем пример подсчета мощности группового двигателя для ремонтной мастерской с 9 станками: в табл. 141 даны наименование станков, сведения, собранные наблюдением за их работой при 8-часовом рабочем дне, и мощности, взятые из каталогов и таблиц, соответственно размерам.

ТАБЛИЦА 141.

С т а н к и	Требуемая мощность kW	Число час. работы в день	Средний коэффициент загрузки η_b	Расход энергии в день kWh
Планшайбный токарный с диам. планшайбы 1,5 м .	3	2	0,60	$3 \cdot 2 \cdot 0,6 = 3,6$
Токарный, высотой центров 200 мм	2	6	0,70	$2 \cdot 6 \cdot 0,7 = 8,4$
Малый токарный	0,5	5	0,80	$0,5 \cdot 5 \cdot 0,8 = 2,0$
Сверлильный—диаметром до 60 мм	4	4	0,60	$4 \cdot 4 \cdot 0,6 = 9,6$
То же — до 30 мм	2	7	0,70	$2 \cdot 7 \cdot 0,7 = 9,8$
Малый быстроходный сверлильный	1	7	0,80	$1 \cdot 7 \cdot 0,8 = 5,6$
Строгальный (величина стола 800×2000 мм)	4	2	0,70	$4 \cdot 2 \cdot 0,7 = 5,6$
Кузнечный вентилятор	0,5	6	1,00	$0,5 \cdot 6 \cdot 1 = 3,0$
Точило	1	4	0,50	$1 \cdot 4 \cdot 0,5 = 2,0$
Итого	18 kW	—	—	49,6

Коэффициент использования установленной мощности *)
 (Ausnutzungsfaktor) $\eta_A = \frac{49,6}{18,8} = 0,34$. В этом коэффициенте учитываются оба коэффициента: одновременности и загрузки. Так как в среднем, согласно вышеприведенным данным, коэффициент загрузки $\eta_b \cong 0,70$, то коэффициент одновременности будет равен $\eta_g = \frac{\eta_A}{\eta_b} = \frac{0,34}{0,7} = 0,49$. Несомненно о среднем коэффициенте загрузки станков можно говорить лишь в том случае, если мощность станков одинакова.

Итак, средняя полезная мощность:

$$P_{\text{mit}} = \frac{49,6}{8} = 6,2 \text{ kW.}$$

Типичным оборудованием металлообрабатывающей мастерской при групповом приводе будет трехступенчатая ременная передача; учитывая к. п. д. одной ступени, согласно вышеуказанному, в 0,85, получим мощность на трансмиссионном валу:

$$P = \frac{P_{\text{mit}}}{0,85^2} = \frac{6,2}{0,85^2} = 8,6 \text{ kW.}$$

Учитывать третью ступень также к. п. д. 0,85 было бы неверно, так как входящие в эту цифру потери в подшипниках относятся к двигателю и учиты-

*) Отличать от коэффициента использования числа станков по времени, т. е. коэффициента одновременности η_g .

ваются его к. п. д. Принимая к. п. д. ременной связи двигателя с трансмиссией равным 0,94, получим мощность электродвигателя:

$$P_m = \frac{8,6}{0,94} = 9,2 \text{ kW.}$$

Выбираем двигателя по стандарту в 10 kW.

Что касается одиночного привода, то выбор мощности должен быть произведен возможно более тщательно, так как ошибка здесь ничем не компенсируется и целиком ложится на электродвигатель. Действительно, при допущении излишней мощности будет страдать общая отдача привода, а выбор двигателя недостаточной мощности может вызвать перегрев и повреждение его, а следовательно, и перерыв в работе, что часто дороже стоимости самого двигателя. Двигатель, рассчитанный по средней мощности, должен быть проверен на перегрузку по наибольшему встречающемуся в работе или при пуске пику нагрузки, иногда очень продолжительному для массивных машин.

Во всяком случае при сравнении с групповым приводом этот „минус“ одиночного должен быть всесторонне учтен как в отношении к. п. д. двигателя, так и коэффициента мощности ($\cos \varphi$) при переменном токе.

Итак, когда расход энергии и к. п. д. всех вариантов определены, можно приступить к окончательному сравнению их с экономической стороны.

Все расходы можно разделить на прямые и косвенные.

А. Прямые расходы составляют из стоимости: а) энергии, б) смазочных и обтирочных материалов, в) ремонта электродвигателей и трансмиссий, г) рабочей силы.

В. Косвенные расходы — из процентов на затраченный капитал и амортизацию оборудования, для чего должна быть составлена смета стоимости всех вариантов.

Таким образом, рассмотренное выше энергетическое сравнение приводов по механическому к. п. д. не решает еще вопроса о выборе с экономической стороны, так как, несомненно, оборудование будет стоить дороже и, следовательно, косвенные расходы выше при одиночном приводе (см. далее).

На этом и заканчивается экономическое сравнение приводов, но, как уже установлено, оно далеко не исчерпывает вопроса о выборе привода, так как учитывает лишь одну сторону и притом зачастую меньшую, потому что стоимости оборудования, и, следовательно, косвенные расходы, различаются незначительно, а эксплуатационные прямые расходы составляют 5—6% от зарплаты.

§ 8. Сравнение одиночного и группового приводов в „производственном“ отношении.

Переходя к вопросам „производственного“ сравнения различных систем привода, казалось бы, прежде всего следовало бы выявить все те требования, которые предъявляет то или иное производство к самому приводу, а затем уже решать вопрос, в какой мере

эти требования могут быть удовлетворены электрическим одиночным или групповым приводом.

Но такой путь привел бы к рассмотрению бесконечно большого числа не только различных производств, но даже и отдельных станков или машин, так как требования, предъявляемые к приводу даже станками одного и того же типа, могут сильно отличаться друг от друга. Для примера можно указать на работу хотя бы двух токарных станков: одного, приспособленного для единичной работы, и другого — для массовой. В то время как первый станок должен быть универсальным, т. е. таким, чтобы его легко можно было приспособить для различной работы, второй станок этой универсальности может не иметь, что не только упростит самую конструкцию станка, но отразится и на электрическом приводе.

Таким образом самое разнообразие требований как будто предпосылает преимущественное применение одиночного электрического привода, так как никакой другой не обладает такой эластичностью в смысле приспособляемости его к производственной машине.

1) Действительно, только электродвигатель дает почти неограниченную возможность дробления движущей энергии „по местам потребления“ до сотых долей л. с. Обслуживая все рабочие элементы станка (вплоть до отдельных катушек прядильной машины), он чрезвычайно упрощает конструкцию самой производственной машины, так как устраняет ненужные громоздкие механические передачи от одного элемента машины к другому, которые неизбежны при централизованном электроснабжении ее с одного места (например от приводного шкива при ременном приводе).

2) Естественно, что указанное свойство немислимо было бы использовать без второй, еще более специфической особенности — возможности управления на расстоянии: полуавтоматического, помощью нажатия электрической кнопки, или даже совершенно автоматического.

3) Разнообразным механическим требованиям (механическим характеристикам) производственных машин отвечает не меньшее разнообразие механических характеристик двигателей, если учесть, кроме естественных, еще и искусственные характеристики (см. главу IV); в особенности ценна жесткость характеристики электродвигателя, требуемая почти всеми станками металлообработки. Таким образом во всех отношениях, т. е. в отношении пусковых условий, условий регулировки и торможения, требования станков могут быть всегда удовлетворены электродвигателем при одиночном приводе.

В частности, существенное требование широкой и плавной регулировки скорости при сохранении жесткой характеристики удовлетворяется не только шунтовыми двигателями постоянного тока, но и трехфазными коллекторными. Асинхронные двигатели при определенном способе переключения полюсов также удовлетворяют этому условию, но при очень ограниченном числе скоростей (2—4).

Регулирование их реостатом в роторе естественно отпадает при требовании жесткой характеристики (станки), но прекрасно может быть использовано для привода машины с вентиляторным моментом сопротивления, где мощность изменяется пропорционально третьей степени числа оборотов, и, следовательно, потери в реостате при

малой скорости не вызовут увеличения размеров двигателя, как это было бы в случае привода, требующего постоянной мощности.

Из перечисленных свойств двигателей, как будет видно далее, наиболее ценными для производственных машин оказываются те, которые способствуют повышению производительности последних, т. е. простому, удобному и быстрому управлению их работой, а именно: а) плавное регулирование скорости, б) удобный и быстрый пуск и торможение (на расстоянии) и с) быстрое и автоматическое реверсирование, наряду, конечно, с высокой экономической отдачей привода.

Несомненно, указанные свойства электродвигателей могут быть использованы целиком только при одиночном приводе и лишь частично при групповом. Наличие приспособлений для регулирования скорости, для реверса и остановки станка в групповом приводе прежде всего определяет конструкцию станка и значительно усложняет ее, что, очевидно, должно отразиться на к. п. д. станка и привода и на стоимости станка. Действительно, как увидим в дальнейшем, к. п. д. станков, предназначенных для группового привода, ниже, чем станков с одиночным и индивидуальным приводом.

Известно, что в целом ряде производств одну из основных составляющих стоимости выпускаемой продукции дает зарплата. Так, в металлообрабатывающей промышленности расход на рабсилу составляет около 36% от общих расходов. Что может уменьшить этот расход? Несомненно, увеличение производительности. Последнее же может быть достигнуто при наличии станков, допускающих плавную регулировку скорости резания, что легко может быть достигнуто одиночным электрическим приводом станка.

Но здесь встает вопрос о пределах регулировки двигателя, т. е. как велико должно быть отношение максимального числа

оборотов к минимальному, $\mathfrak{N}_m = \frac{n_{max}}{n_{min}}$? Взяв очень большие пре-

делы $\mathfrak{N}_m$, можно очень сильно удорожить двигатель и тем самым свести на-нет выгоды от применения регулирования. В то же время при малых пределах регулировки будет иметь место недоиспользование станка.

Очевидно, есть какое-то наимыгоднейшее решение этой части вопроса, которое должно составить предмет сравнения различных систем приводов.

Итак, при разрешении вопросов электрификации производственных машин прежде всего необходимо установить:

а) какие свойства электродвигателя могут быть использованы в данном случае, а затем

б) выявить экономически наиболее приемлемый вид привода и тип двигателя.

Так, например, при электрификации машин цементного производства центральным вопросом является расход механической энергии; о применении регулировки говорить почти не приходится, что, само собой разумеется, предопределяет систему привода и тип двигателей.

Иначе дело обстоит в случае электрификации бумажных машин или металлообрабатывающих станков. Расход энергии на произ-

водственные цели в данном случае незначителен; так, в металлообрабатывающей промышленности он не выше 4—5% от стоимости продукции. В то же время большинство машин и станков здесь требует плавной регулировки, которая не только улучшает качество продукции, но и в значительной мере увеличивает производительность.

Влияние электрического оборудования на качество выпускаемой продукции особенно заметно, например при электрификации кольцевой прядильной машины с применением регулируемого двигателя, шунтового или коллекторного.

Так как натяжение нити при прядении и наматывании на шпулю является функцией числа оборотов и диаметра намотки, а последний при конической намотке рядами изменяется (фиг. 451) непрерывно в каждом ряду, то при постоянной скорости вращения натяжение будет непрерывно и систематически изменяться. Чтобы избежать последствий этого в виде неравномерной плотности нити и даже частых обрывов ее, необходимо

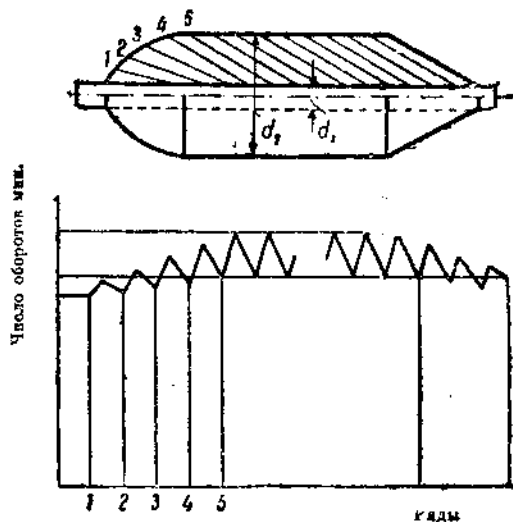
соответственно диаметру менять число оборотов и притом весьма плавно и регулярно при намотке каждого ряда.

На диаграмме внизу фиг. 460 представлена такая регулировка скорости, достигаемая автоматом, воздействующим на положение ручки реостата шунтового двигателя или щеток коллекторного, в связи с изменением диаметра намотки.

Скорость изменяется от 650 об/мин до 750 об/мин при намотке первого ряда и постепенно до шестого ряда увеличивает амплитуду колебаний до 750—1000 об/мин, которая затем поддерживается на цилиндрической части шпули. Сложное устройство автоматического регулятора оправдывается не только достигаемым улучшением качества пряжи (ровной и без узлов), но и повышением производительности машины на 5—15%.

§ 9. Метод выбора электрического привода на частном примере привода для металлообрабатывающего станка.

Для того чтобы лучше уяснить себе все вышеизложенное, возьмем конкретный пример из области применения электродвигателя к металлообрабатывающим станкам и укажем метод определения наиболее рационального привода и типа двигателя как с технической, так и с экономической стороны. Придерживаясь установлен-



Фиг. 460.

ного выше порядка, в данном частном случае необходимо выявить: 1) мощность станка, 2) необходимую регулировку, 3) род и тип двигателя и после этого произвести 4) сравнение нескольких вариантов привода.

1. **Определение мощности станка.** Вопрос определения мощности, являющийся простым для многих производственных машин, по отношению к металлообрабатывающим станкам в редких случаях может быть разрешен с необходимой степенью точности, несмотря на то, что основным процессом работы всех металлообрабатывающих станков является один и тот же процесс резания.

Одной из наиболее существенных причин этого является то обстоятельство, что металлообрабатывающие станки в большинстве конструируются для разнохарактерной работы как в отношении размеров и способа обработки, так и в отношении материала обрабатываемых деталей.

Из механической технологии известен целый ряд эмпирических формул, служащих для определения необходимой мощности различных типов станков, причем в этих формулах обычно связываются функциональной зависимостью величины, характеризующие работу резания, как-то: скорость резания, подача, глубина резания, коэффициент резания, угол заострения резца и т. д.

Эти формулы можно найти в соответствующем справочнике; частично они были даны выше, в § 7. *)

Характерно, что электротехнические фирмы в своих каталогах также начинают приводить таблицы необходимой мощности для привода различного рода станков; так, например, фирма Сименс-Шукерт в каталоге от 1925 г. приводит для металлообрабатывающих станков нижеследующую таблицу:

На 1 kg снимаемой стружки в 1 мин. требуют:

Сверлильные станки, при мягкой стали	0,2	kW
" " чугуна	0,1	"
Фрезерные	0,75	"
Фрезерные для нарезки зубчатых колес	1,5 —	2,25 "
Пилы для холодной резки металла	0,75 —	6,0 "
Токарные станки	0,2 —	2,0 "
Лобовые станки	1,5 —	11,0 "
Револьверные станки	0,35 —	4,0 "
Ножицы	0,75 —	4,0 "
Шлифовальные станки	0,35 —	2,0 "

2. **Определение системы регулирования.** Разрешение следующего основного вопроса о регулировке скорости резания заключается в определении:

а) количественной стороны регулирования, т. е. так называемого предела регулирования станка (R):

$$\mathfrak{N} = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4 \cdot r_5$$

в зависимости от рода обрабатываемого металла (r_1), от рода резца (r_2), рода обработки (r_3), смазки (r_4) и диаметра обточки (r_5);

б) качественной стороны регулировки, т. е. плавности регулирования и влияния ее на производительность станка.

*) См. также Хюлле, Станки; Челюсткин, Токарные станки; Глебов, Искусство наивыгоднейшего резания металлов.

а) Для выявления количественной стороны возьмем конкретный пример в виде токарного станка и посмотрим, в какой мере и от чего зависит предел регулировки подобного рода станков.

Прежде всего скорость резания должна быть регулируема в зависимости от материала обрабатываемой детали. Действительно, на одном и том же станке может обрабатываться деталь и из чугуна, и из стали, и из меди; скорость же резания, как известно, для всех этих материалов неодинакова. Наивыгоднейшая скорость резания определяется и производительностью, и стоимостью реза, и стоимостью заточки его. При обработке медной детали она в среднем равна 30 м/мин, *) в то время как при обработке детали из твердого чугуна она не превышает 5 м/мин. Обработка стальных деталей требует скоростей от 10 до 20 м/мин. Следовательно, станок, предназначенный для работы на чугуне, стали и меди, должен иметь предел регулировки

$$r_1 = \frac{30}{5} = 6.$$

Приведенные выше цифры наивыгоднейших скоростей относятся к случаю работы с резами инструментальной стали. Если те же детали будут обрабатываться резами из быстрорежущей стали, то наибольшая скорость резания с 30 м/мин может быть увеличена до 35 м/мин, т. е. в отношении 35:30 или $r_2 = 1,17$.

Но все эти цифры применимы в том случае, если на станке производится „обдирка“, т. е. снятие крупной стружки. Очень часто на токарных станках производятся шлифовальные работы, которые требуют большей скорости резания, чем обдирочные работы; например, при работе с медью скорость резания может быть повышена в среднем до 45 м/мин, т. е. в отношении к работе на обдирке в $45:35 = 1,28$ раза, и соответственно предел регулировки $r_3 = 1,28$.

Если бы станок предназначался только для работы с деталями из чугуна, а не стали, тогда можно было бы увеличить скорость резания за счет применения искусственного охлаждения в виде масла, эмульсии и тому подобных охлаждающих жидкостей. По опытам проф. Шлезингера, в среднем это увеличение может быть выражено в 20%, т. е. $r_4 = 1,2$.

И, наконец, в случае работы на токарных станках должно быть учтено каким-то коэффициентом различие в диаметрах обрабатываемых деталей. Несомненно, этот коэффициент является величиной переменной, зависящей от конструкции станка, и, как это будет видно из дальнейшего, имеет наивыгоднейшую величину, не превосходящую 5—6 (фиг. 469). Итак $r_5 = 5$.

Для определения общего предела регулировки станка, очевидно, необходимо перемножить соответствующие коэффициенты $R = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4 \cdot r_5$.

Так, если станок предназначается для работы с деталями из чугуна, стали, меди, с резами из инструментальной и быстрорежущей стали, на обдирке и на шлифовании и при диаметрах дета-

*) F. Hülle, Die Grundzüge der Werkzeugmaschinen und der Metallbearbeitung, B. III, 1926, стр. 50.

лей, относящихся друг к другу как 5:1, то общий предел регулирования:

$$\mathfrak{R} = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4 = 6 \cdot 1,17 \cdot 1,28 \cdot 5 = 45.$$

Имея под руками таблицу наимыгоднейших скоростей резания, можно подобным же методом разрешить указанную задачу и для сверлильных, фрезерных, строгальных и других станков.

б) Перейдем к вопросу о качественной стороне регулировки.

Наиболее ранним конструктивным оформлением устройства, регулирующего скорость резания, является ступенчатый шкив. При всей своей простоте он оказывается чрезвычайно громоздким при большом количестве скоростей. Необходимо иметь в виду, что ступенчатый шкив и зубчатые переборы подбираются на ряд скоростей, составляющих геометрическую прогрессию, и, следовательно, при определенном коэффициенте прогрессии и пределе регулировки число ступеней шкива легко может быть определено. Например, задавшись коэффициентом прогрессии (скачком скорости) *)

$$\varphi = \frac{n_2}{n_1},$$

получим

$$z = \varphi \cdot n_1,$$

$$n_2 = \varphi \cdot n_1 = \varphi^2 \cdot n_1,$$

$$n_3 = \varphi^2 \cdot n_1,$$

где n_1 и n_2 — соответственно наименьшее и наибольшее число оборотов шпинделя станка и z — число ступеней.

$$\mathfrak{R} = \frac{n_2}{n_1} = \varphi^{z-1}$$

или

$$\lg \mathfrak{R} = (z-1) \lg \varphi,$$

откуда

$$z = \frac{\lg \mathfrak{R}}{\lg \varphi} + 1. \quad (323)$$

Для рассмотренного выше случая, когда $\mathfrak{R} = 45$ и $\varphi = 1,2$,

$$z = \frac{\lg 45}{\lg 1,2} + 1 = \frac{1,654}{0,080} + 1 \cong 22,$$

т. е. шкив должен иметь 22 ступени.

Приведенный пример указывает, что достижение предела регулировки станка $\mathfrak{R} = 45$ при заданном $\varphi = 1,2$ конструктивно невозможно, так как 22-ступенчатый шкив потребовал бы чрезмерных размеров передней бабки станка. Несколько компактнее станок с зубчатым перебором.

*) См. „Условные обозначения“ в начале II тома, примечание к передаточному коэффициенту „и“.

Само собой разумеется, что величина φ характеризует плавность регулировки. Значение $\varphi = 1,2$ соответствует станку со средней плавностью регулировки.

Применяя электрический привод к токарным станкам, наиболее целесообразным казалось бы жестко соединить вал двигателя со шпинделем и всю регулировку осуществить самим двигателем. Однако из электромеханики известно, что размеры двигателя определяются наименьшим числом оборотов, т. е. наибольшим моментом M , если мощность на валу двигателя остается постоянной при изменении числа оборотов, как этого требуют почти все металлообрабатывающие станки. Наименьшее число оборотов шпинделя зависит от наибольшего диаметра обрабатываемой детали и обычно равно 5—10 в 1 мин. Двигатель на такую скорость построить нельзя. Таким образом применение в металлообрабатывающих станках промежуточных передач является неизбежным, регулировку же электродвигателя $\mathfrak{N}_m$ целесообразно иметь не выше 4:1 или в крайнем случае 5:1. Применяя такой двигатель, можно прежде всего несомненно уменьшить число механических промежуточных передач. В рассмотренном выше примере это уменьшение будет очень значительным. В самом деле, предположим, что двигатель выбран с регулировкой в пределах $\mathfrak{N}_m$; тогда скачок скорости между механическими ступенями $\varphi \geq \mathfrak{N}_m$.

Принимая предварительно их равными, т. е. $\varphi = \mathfrak{N}_m = \varphi_m$, получим число механических ступеней m из уравнения (323):

$$m = \frac{\lg \mathfrak{N}}{\lg \varphi_m} + 1, \quad (323')$$

Подставляя из предыдущего примера $\mathfrak{N} = 45$, а для φ_m принимая нормальный предел регулирования электродвигателя $\mathfrak{N}_m = 3$, получим число механических ступеней:

$$m = \frac{\lg 45}{\lg 3} + 1 = \frac{1,654}{0,4771} + 1 \cong 4.$$

Итак, вместо 22 ступеней скорости шпинделя, достигаемых механическим путем, в данном случае получается только 4 механических ступени, что, очевидно, чрезвычайно упростит и соответственно удешевит станок.

Плавность же регулирования не только не уменьшится, но ее легко можно увеличить, используя электрическую регулировку на каждой из механических ступеней.

Так, например, чтобы сохранить прежнюю плавность, характеризуемую в данном примере скачком скорости $\varphi = 1,2$, необходимо будет ввести $(k-1)$ ступеней электрической регулировки (при k контактах реостата) на каждой механической ступени, характеризуемой скачком $\varphi_m = 3$, причем по предыдущему: $\varphi_m = \varphi^{k-1}$, откуда:

$$k = \frac{\lg \varphi_m}{\lg \varphi} + 1, \quad (324)$$

т. е. для нашего примера:

$$k = \frac{\lg 3}{\lg 1,7} + 1 = 7,$$

иначе говоря, реостат должен иметь 6 ступеней скорости или 7 контактов если считать первый контакт за контакт короткого замыкания реостата.

Так как реостат для регулируемого шунтового двигателя, рассчитываемый на ничтожную силу тока возбуждения (порядка 2—4% главного тока), является дешевым и компактным аппаратом, то и число контактов его, обычно гораздо большее, чем у пускового реостата, достигает сотен в случае требования особой плавности. Для целей же металлообработки, как будет далее показано, стандартное число контактов (порядка одного или двух десятков) является более чем достаточным.

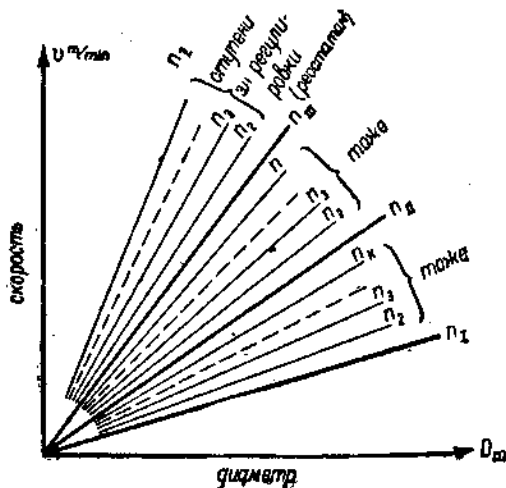
Итак, удешевление станка должно окупить главным образом стоимость двигателя или разность стоимости регулируемого и нерегулируемого двигателей;

количество же ступеней, в противоположность механической регулировке, достигается здесь настолько дешевой ценой, что по сравнению с ценой двигателя о ней можно вообще не говорить, тем более что, как видно будет далее из уравнения (327), выбранное число электрических ступеней скорости будет использовано в общем пределе регулирования $\mathcal{N}$ столько раз, сколько взято механических ступеней.

Помимо удешевления станка увеличение числа ступеней скорости (плавности) вызывает уменьшение

времени обработки [см. далее уравнение (335)], т. е. увеличение производительности, что при выборе электрического привода может играть еще большую роль, чем удешевление станка.

Для более точных подсчетов количества механических ступеней станка необходимо пользоваться другими формулами, вывод которых основан на допущениях, принятых при выводе формулы (323), но с некоторыми поправками, обусловленными применением регулируемого двигателя: на фиг. 461 представлена так называемая „лучевая“ диаграмма зависимости скорости резания от диаметра обрабатываемой детали. Так как окружная скорость $v = \pi \cdot D \cdot n$, то при постоянном n получаем прямолинейную зависимость между v и D , а следовательно, при различных значениях n (параметра, получается целый ряд лучей, исходящих из начала координат. На фиг. 461: n_1 — основное наименьшее число оборотов, n_2 — число



Фиг. 461.

оборотов шпинделя при положении ручки шунтового реостата на втором контакте (считая первый контакт короткого замыкания реостата), n_3 — на третьем контакте и т. д., n_k — число оборотов шпинделя при положении ручки шунтового реостата на последнем контакте, n_{II} — число оборотов шпинделя при переходе на следующую механическую ступень (и возвращении реостата на I контакт). Математически это может быть выражено следующим образом:

$$n_2 = \varphi_p n_1 \quad (\text{где } \varphi_p \text{ — коэффициент геометрической прогрессии})$$

$$n_3 = \varphi_p^2 n_1$$

.....

$$n_k = \varphi_p^{k-1} n_1 = \varphi_m n_1 \quad (\text{где } \varphi_m = \mathfrak{R}_m \text{ — регулировка двигателя})$$

$n_{II} = \varphi_p^{k-1} n_1 \cdot \varphi_p = \varphi_p^k \cdot n_1 = \varphi_m \varphi_p \cdot n_1$, если предполагать, что скачок скорости от n_k до n_{II} равен φ_p , а скачок скорости между механическими ступенями равен $\varphi_m \cdot \varphi_p$.

Аналогично n_{II} имеем для последней m -ой механической ступени n_m :

$$n_m = \varphi_m^{m-1} \varphi_p^{m-1} \cdot n_1.$$

Отсюда для наивысшей скорости n_s имеем, учитывая использование электрической регулировки после включения последней механической m -ой ступени: $n_s = \varphi_m^m \varphi_p^{m-1} n_1$ (где степень m — число механических ступеней),

$$\frac{n_s}{n_1} = \mathfrak{R} = \varphi_m^m \varphi_p^{m-1} \quad \text{или} \quad \lg \mathfrak{R} = m \lg \varphi_m + (m-1) \lg \varphi_p. \quad (325)$$

Из уравнения (325), представляющего зависимость между R , φ_m , m и φ_p , можно легко определить любую из указанных величин, если три остальные будут известны. Так, например:

$$m = \frac{\lg \mathfrak{R} + \lg \varphi_p}{\lg \varphi_m + \lg \varphi_p} = \frac{\lg (\mathfrak{R} \cdot \varphi_p)}{\lg (\varphi_m \cdot \varphi_p)}$$

или, подставляя вместо $\varphi_m = \mathfrak{R}_m$ определенную из уравнения (324) величину $\lg \varphi_m = (k-1) \lg \varphi_p$, получаем:

$$m = \frac{\lg (\mathfrak{R} \cdot \varphi_p)}{(k-1) \lg \varphi_p + \lg \varphi_p} = \frac{\lg (\mathfrak{R} \cdot \varphi_p)}{k \cdot \lg \varphi_p}. \quad (326)$$

Подставляя в уравнение (325) $\lg \varphi_p = \frac{\lg \varphi_m}{k-1}$ из уравнения (324), имеем:

$$\lg \mathfrak{R} = m \lg \varphi_m + (m-1) \frac{\lg \varphi_m}{k-1} = \lg \varphi_m \left(m + \frac{m-1}{k-1} \right) = \lg \varphi_m \frac{mk-1}{k-1},$$

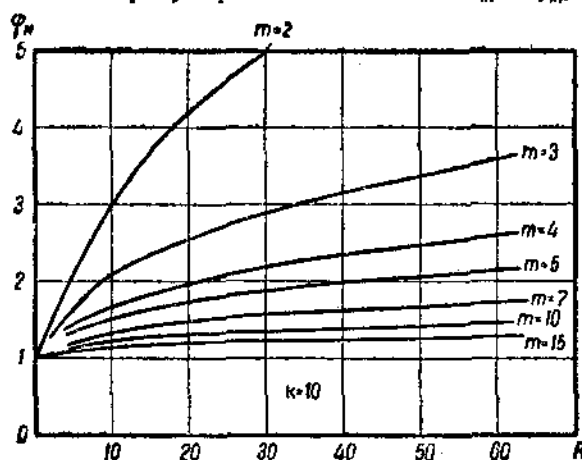
откуда

$$\lg \varphi_m = \frac{k-1}{mk-1} \lg \mathfrak{R}$$

или

$$\varphi_m = \mathfrak{R}^{\frac{k-1}{mk-1}} = \mathfrak{R}^{\frac{k-1}{s-1}} \quad (327)$$

Полученная формула дает возможность определить необходимые пределы регулировки двигателя $\mathfrak{R}_m = \varphi_m$, если известны величины



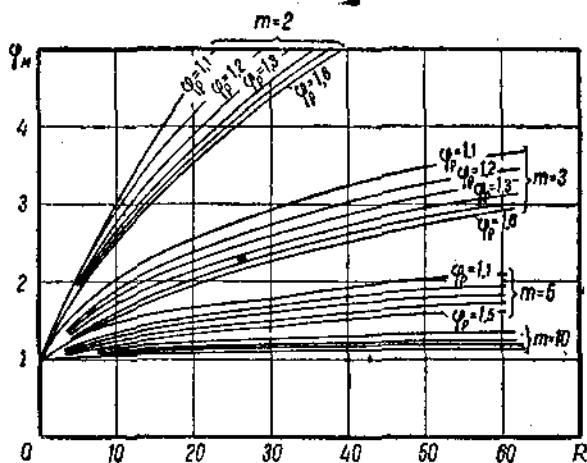
Фиг. 462.

контактов реостата неизвестно, то нетрудно из уравнения (325) определить φ_m в зависимости от φ_p , m и $\mathfrak{R}$, а именно:

$$\varphi_m = \sqrt[m]{\frac{\mathfrak{R}}{\varphi_p^{m-1}}} = \frac{1}{\varphi_p} \sqrt[m]{\mathfrak{R} \cdot \varphi_p}. \quad (328)$$

На фиг. 463 представлена геометрическая интерпретация этого уравнения. Как и следовало ожидать, при больших значениях m , т. е. при большом количестве механических ступеней в станке, в границах нормальной регулировки $\mathfrak{R}$ электродвигатели должны выбираться с небольшим пределом регулировки $\mathfrak{R}_m = \varphi_m$. На практике это условие не всегда соблюдается. Очень часто выбранная регулировка электродвигателя $\mathfrak{R}_m$ не соответствует конструкции станка как в отношении числа механических ступеней, так и в отношении величины скачка φ_p в числе оборотов при переходе с одной скорости на другую.

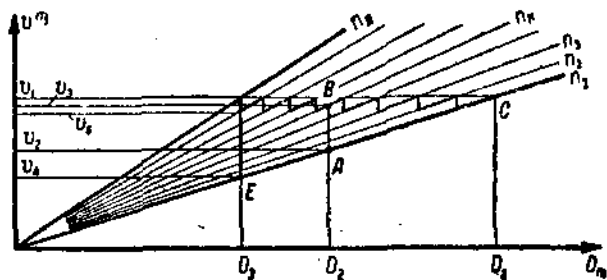
Влияние плавности. Выяснив вопрос о количественной и качественной стороне регулировки металлообрабатывающих стан-



Фиг. 463.

ков, перейдем к уточнению вопроса о влиянии плавности регулировки станка на производительность его на частном примере изменения диаметра, т. е. приняв $\mathfrak{R} = \lambda_k$.

Для примера возьмем два токарных станка: с плавной и грубой регулировкой. Пусть будут заданы: скорость резания v_1 и конечный диаметр обрабатываемой детали D_2 . Предположим, что указанная скорость v_1 является наиболее выгоднейшей и что превышения ее не допускается. Сделаем также допущение, оправдываемое в большинстве случаев, что ни на том, ни на другом станке эта скорость в точности не может быть достигнута при данном диаметре обрабатываемой детали. Работая на станке с грубой регулировкой (фиг. 452 и 464, числа оборотов n_1, n_2 и т. д.), имеем среднюю скорость резания v_2 , значительно меньшую заданной v_1 ; при работе же на станке с плавной регулировкой (числа оборотов $n_1, n_2, n_3 \dots$) данную деталь можно обрабатывать со скоростью v_2 , значительно отличающейся от заданной v_1 . Определим экономию во времени, получаемую при работе на втором станке. Время одного оборота детали на первом станке:



Фиг. 464.

то же на втором станке:

$$t_1 = \frac{60}{n_1} \text{ sec.},$$

то же на втором станке:

$$t_2 = \frac{60}{n_k} \text{ sec.},$$

но $n_k = n_1 \cdot \varphi_{p2}^{k-1}$; следовательно,

$$t_2 = \frac{60}{n_1} \frac{1}{\varphi_{p2}^{k-1}}.$$

Экономия во времени (на 1 оборот):

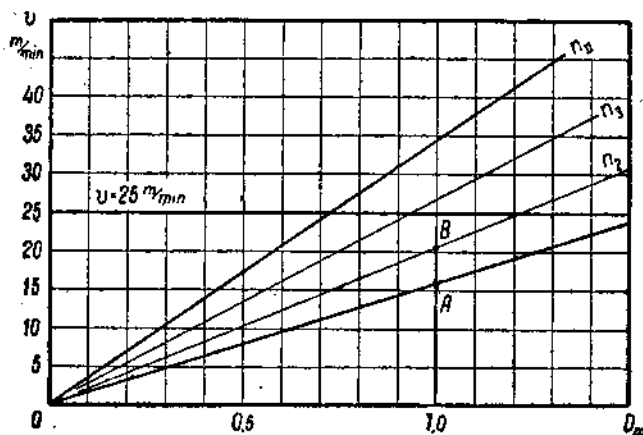
$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{60}{n_1} \left(1 - \frac{1}{\varphi_{p2}^{k-1}} \right) = \frac{60 \cdot \pi D_1}{v_1} \left(1 - \frac{1}{\varphi_{p2}^{k-1}} \right). \quad (329)$$

Здесь D_1 — диаметр детали, соответствующий заданной скорости резания v_1 . На фиг. 465 и 466 приведены части лучевой диаграммы трех станков, причем у первого (фиг. 465) $\varphi_{p1} = 2,2 \left(\frac{n_{II}}{n_I} = \frac{v_{II}}{v_I} = \frac{35}{16} = 2,2 \right)$, у второго $\varphi_{p2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{21}{16} = 1,3$ (фиг. 465) и у третьего $\varphi_{p3} = 1,05$ (фиг. 466).

При заданной скорости резания, равной 25 м/мин, диаметре

обрабатываемой детали, равно 1 м и $n_1 = 5 \text{ об/мин}$ получается при работе на втором станке по сравнению с работой на первом станке экономия времени на 1 оборот детали

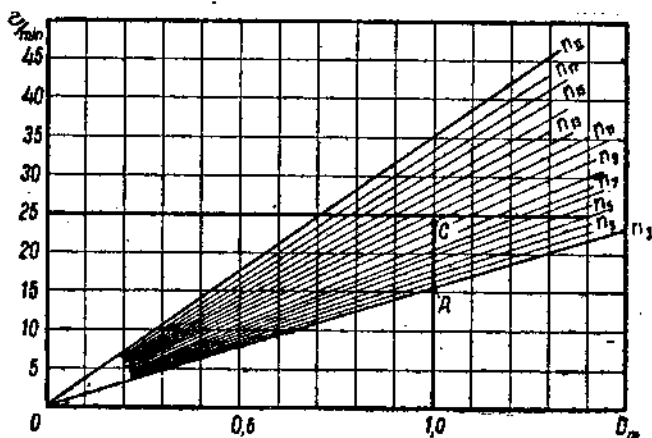
$$\Delta t_1 = \frac{60}{n_1} \left(1 - \frac{1}{\varphi_{p2}^{k-1}} \right) = \frac{60}{5} \left(1 - \frac{1}{1,3^{2-1}} \right) = 2,76 \text{ сек.},$$



Фиг. 465.

то же при работе на третьем станке (учитывая, что заданный режим $v = 25 \text{ м/мин}$ соответствует 10-му лучу, т. е. $k = 10$ по фиг. 466):

$$\Delta t_2 = \frac{60}{5} \left(1 - \frac{1}{1,05^{10-1}} \right) = 4,3 \text{ сек.}$$



Фиг. 466.

Точка А на диаграммах соответствует работе на первом станке, точка В—на втором и точка С—на третьем. В первом случае экономия в процентах:

$$\Delta t_1 \% = \frac{2,76 \cdot 5}{60} \cdot 100 = 23\%$$

во втором случае:

$$\Delta t_2 \% = \frac{4,3 \cdot 5}{50} 100 = 36\%.$$

Указанная экономия во времени, очевидно, не остается постоянной для данной конструкции станка, а зависит также и от диаметра обрабатываемой детали и заданной скорости резания, ибо формула (329) может быть представлена в виде:

$$\Delta t = \alpha \cdot \frac{60 \cdot \pi \cdot D_2}{v_1} \left(1 - \frac{1}{\varphi_{p2}^{k-1}} \right), \quad (329')$$

где $D_1 = \alpha \cdot D_2$, причем D_2 — конечный диаметр обрабатываемой детали, а α — коэффициент, указывающий, во сколько раз D_1 больше D_2 , причем $\varphi_{p1} \geq \alpha \geq 1$.

Если на станке производятся работы, при которых резец перемещается перпендикулярно оси вращения станка (лобового), то уменьшение производительности, происходящее оттого, что на станке не может быть достигнуто постоянство скорости резания, легко определяется, если известна величина φ_p . Действительно, при обработке детали от диаметра D_1 (фиг. 464) до диаметра D_2 на станке с грубой регулировкой скорости резания изменяется от v_1 до v_4 , если число оборотов шпинделя станка не меняется. Следовательно, работа ведется в среднем со скоростью

$$v_{mit_1} = \frac{v_1 + v_4}{2} = \frac{v_1 + \frac{v_1}{\varphi_{p1}}}{2} = \frac{v_1}{2\varphi_{p1}} (\varphi_{p1} + 1).$$

В случае работы на станке с более плавной регулировкой φ_{p2} средняя скорость равна

$$v_{mit_2} = \frac{v_1 + v_5}{2} = \frac{v_1}{2\varphi_{p2}} (\varphi_{p2} + 1).$$

Разница между v_{mit_2} и v_{mit_1} дает величину, характеризующую увеличение производительности в случае применения станка с плавной регулировкой:

$$v_{mit_2} - v_{mit_1} = \frac{v_1}{2} \left(\frac{\varphi_{p2} + 1}{\varphi_{p2}} - \frac{\varphi_{p1} + 1}{\varphi_{p1}} \right) = \frac{v_1}{2} \cdot \frac{\varphi_{p1} - \varphi_{p2}}{\varphi_{p2} \cdot \varphi_{p1}}. \quad (330)$$

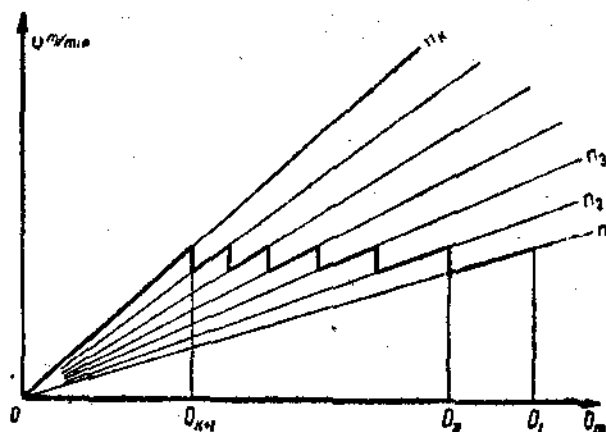
Для рассмотренного случая, когда $v = 25$ м/мин, $\varphi_{p1} = 2,2$, $\varphi_{p2} = 1,3$, получим при работе в пределах от D_1 до D_3 .

$$v_{mit_2} - v_{mit_1} = \frac{25}{2} \cdot \frac{2,2 - 1,3}{2,2 \cdot 1,3} = 3,9 \text{ м/мин},$$

т. е. средняя скорость в указанных пределах у станка с плавной регулировкой на 3,9 м/мин выше, чем у станка с грубой регулировкой.

Подобная работа имеет место на лобовых станках. Небесполезно будет остановиться на ней подробнее, тем более что вли-

яние плавности регулировки здесь сказывается особенно резко на производительности станка.



Фиг. 467.

На фиг. 467 представлена лучевая диаграмма лобового станка. Если необходимо пройти резцом от диаметра D_1 до 0, т. е. до центра, то продолжительность этого процесса на нерегулируемом станке будет равна

$$T_1 = \frac{D_1}{2 \cdot s} \cdot \frac{60}{n_1},$$

где s — подача в мм и D_1 — диаметр детали, также в мм.

При условии регулировки согласно

фиг. 467 в пределах от D_1 до D_{z+1} время обработки определяется как сумма членов:

$$T_2 = t_1 + t_2 + \dots + t_z + t_{z+1},$$

где

$$t_1 = \frac{D_1 - D_2}{2 \cdot s} \cdot \frac{60}{n_1} = \frac{60 \cdot D_1}{2 \cdot s \cdot n_1} \left(\frac{\varphi_p - 1}{\varphi_p} \right),$$

так как $D_2 = D_1 : \varphi_p$;

$$t_2 = \frac{D_2 - D_3}{2 \cdot s} \cdot \frac{60}{n_2} = \frac{60 \cdot D_1}{2 \cdot s \cdot n_1} \left(\frac{\varphi_p - 1}{\varphi_p^2} \right),$$

так как $n_2 = n_1 \varphi_p$, и $D_3 = \frac{D_1}{\varphi_p^2}$;

$$t_z = \frac{60 \cdot D_1}{2 \cdot s \cdot n_1} \frac{\varphi_p - 1}{\varphi_p^{2z-1}} *$$

$$t_{z+1} = \frac{(D_{z+1} - 0) \cdot 60}{2 \cdot s \cdot n_z} = \frac{60 \cdot D_1}{2 \cdot s \cdot n_1} \cdot \frac{1}{\varphi_p^{2z-1}} **$$

$$T_2 = t_1 + t_2 + \dots + t_z + t_{z+1} = \frac{60 \cdot D_1}{2 \cdot s \cdot n_1} \left[\frac{1}{\varphi_p} + \frac{1}{\varphi_p^2} + \dots + \frac{1}{\varphi_p^{2z-1}} \right] (\varphi_p - 1) + \frac{60 \cdot D_1}{2 \cdot s \cdot n_1} \frac{1}{\varphi_p^{2z-1}} \dots \quad (331)$$

*) В данном случае $z = m \cdot k$ — общее число ступеней скорости шпинделя станка.

**) Так как n_z — наибольшее число оборотов, то в дальнейшем регулировки уже нет, и обработка идет с постоянным числом оборотов от D_{z+1} до 0, т. е. до центра.

Выражение в квадратных скобках представляет собой сумму членов убывающей геометрической прогрессии, знаменатель которой равен $\frac{1}{\varphi_p^2}$. Эта сумма, как известно, равна

$$\Sigma = \frac{\frac{1}{\varphi_p} \left(1 - \frac{1}{\varphi_p^{2z}} \right)}{1 - \frac{1}{\varphi_p^2}}.$$

Подставляя это выражение в уравнение (331), получим:

$$\left. \begin{aligned} T_2 &= \frac{60 \cdot D_1}{2 \cdot s \cdot n_1} \left[\frac{\frac{1}{\varphi_p} \left(1 - \frac{1}{\varphi_p^{2z}} \right)}{1 - \frac{1}{\varphi_p^2}} \right] (\varphi_p - 1) + \frac{60 D_1}{2 \cdot s \cdot n_1} \cdot \frac{1}{\varphi_p^{2z-1}} = \\ &= \frac{60 D_1}{2 s n_1} \left[\frac{\varphi_p^{2z} - 1}{\varphi_p^{2z+1} (\varphi_p + 1)} \varphi_p^2 + \frac{1}{\varphi_p^{2z-1}} \right] = \\ &= \frac{60 D_1}{2 s n_1} \cdot \frac{1}{\varphi_p^{2(z-1)}} \left[\frac{1 + \varphi_p^{2z-1}}{1 + \varphi_p} \right] = T_1 \frac{1 + \varphi_p^{2z-1}}{(1 + \varphi_p) \varphi_p^{2(z-1)}} = T_1 \lambda \end{aligned} \right\} \quad (332)$$

Итак, при регулировке время обработки уменьшается, так как λ меньше единицы. В условиях работы с идеально плавной регулировкой величина λ стремится к 0,5.

Например, при $\varphi_p = 1,05$ и $z = 40$

$$T_2 = 0,525 T_1.$$

Формулу (332) можно представить в другом виде, а именно, считая, что

$$\varphi_p^{z-1} = \Re \text{ или } \varphi_p^{2z-1} = \Re \cdot \varphi_p^z,$$

получим из уравнения (332):

$$T_2 = T_1 \frac{1 + \Re \cdot \varphi_p^z}{(1 + \varphi_p) \cdot \Re^2} \quad (333)$$

или, преобразуя из уравнения (323'):

$$T_2 = T_1 \frac{1 + \Re \cdot \varphi_p^{\frac{\lg \Re}{\lg \varphi_p} + 1}}{(1 + \varphi_p) \cdot \Re^2} \quad (334)$$

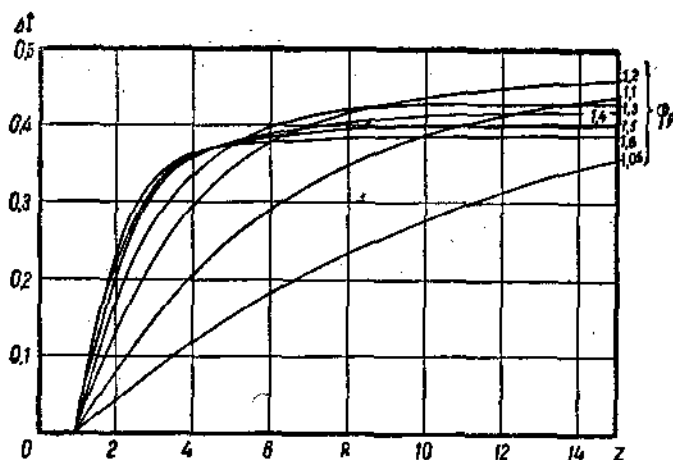
Пользуясь формулами (332), (333) и (334), нетрудно для каждого частного случая подсчитать необходимое время обработки. Разность между T_1 и T_2 дает ту экономию времени, которая получается в случае применения регулируемого станка:

$$\left. \begin{aligned} \Delta T &= T_1 - T_2 = T_1 \frac{(1 + \varphi_p) \varphi_p^{2(z-1)} - \varphi_p^{2z-1}}{(1 + \varphi_p) \varphi_p^{2(z-1)}} - 1 = \\ &= T_1 \frac{\varphi_p^{2(z-1)} - 1}{(1 + \varphi_p) \cdot \varphi_p^{2(z-1)}} \end{aligned} \right\} \quad (335)$$

или, вводя $\varphi_p z^{-1} = \mathfrak{R}$:

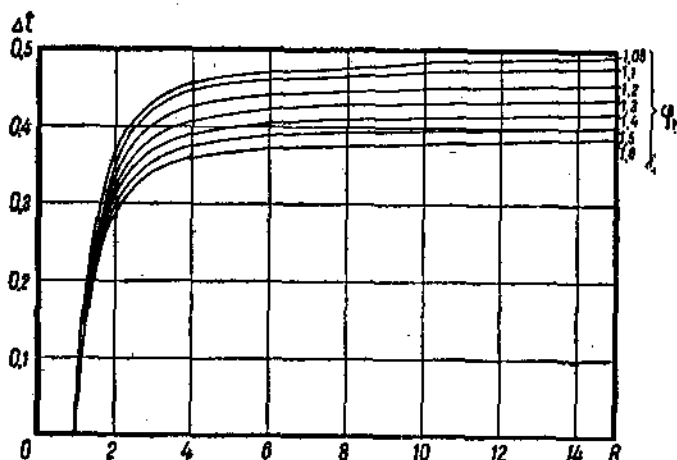
$$\Delta T = T_1 \frac{\mathfrak{R}^2 - 1}{(1 + \varphi_p) \mathfrak{R}^2} \quad (336)$$

На фиг. 468 представлена зависимость между ΔT и z согласно уравнению (335), а на фиг. 469 — зависимость между ΔT и $\mathfrak{R}$



Фиг. 468.

согласно уравнению (336). Анализ кривых фиг. 469 показывает, что обработка на станке происходит так, что если из всех условий, оха-



Фиг. 469.

рактеризованных выше выражением $\mathfrak{R} = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4 \cdot r_5$, изменяется лишь диаметр обработки, ($\mathfrak{R} = r_5$), то производственной точки зрения предел регулировки $\mathfrak{R}$ не должен превосходить 5—6. Вот почему

при определении общих пределов регулировки станка величину r_2 (предела регулирования в зависимости от диаметра) не берут больше этой цифры.

Примерно то же можно сказать и про наимыгоднейшее число ступеней скорости шпинделя станка, если условия работы будут теми же самыми; действительно, точки перегиба кривых (фиг. 459) для значений величины φ , наиболее часто применяемых, лежат в пределах от 8 до 10, и только для $\varphi = 1,05$ точка перегиба перемещается к значению $z = 20$.

Если считать, что необходимая область регулировки станка покрывается одним двигателем (постоянного тока), то число контактов шунтового реостата должно находиться в указанных выше пределах.

Эти выводы подтверждаются практикой применения к металлообрабатывающим станкам шунтовых электродвигателей, пределы регулировки которых $\mathcal{M}_m$ выбираются обычно равным 3:1,4:1 и максимум 5:1, а регулировочные реостаты имеют от 10 до 20 контактов, в зависимости от принятого φ .

Итак, для станков с непрерывным изменением диаметра обработки (лобовых, карусельных, обрезных) плавкая электрическая регулировка играет большую роль. Этим условиям удовлетворяет главным образом шунтовой двигатель постоянного тока (см. фиг. VIII в введении) и при известных условиях (см. главу IX) шунтовой двигатель переменного тока (коллекторный).

Что касается остальных условий обработки, охарактеризованных выше, в § 9 величинами r_1 , r_2 , r_3 и r_4 то, по крайней мере для станков малого размера, они могут быть удовлетворены механическим регулированием или короткозамкнутыми асинхронными двигателями с переключением полюсов.

В крупных станках большое число скоростей не может быть достигнуто механическим регулированием (коробкой скоростей) по конструктивным соображениям (громоздкости), и обычно к 3—4 переборам добавляется электрическая регулировка (см. примечание на стр. 328). Все крупные регулируемые станки электрифицируются поэтому почти исключительно постоянным током. *)

Что касается средних и тем более мелких станков, то применение постоянного тока связано с основной установкой станкостроения. Если эта установка на узкую специализацию при массовом производстве, то постоянному току здесь несравненно меньше места, чем при установке на универсальность станка.

Для осуществления непрерывной регулировки скорости резания в зависимости от диаметра обрабатываемой детали (при работе на лобовых станках и на отрезных) чрезвычайно желательно применять автоматы, совершенно освобождающие рабочего у станка от управления двигателем.

Идея такого устройства представлена на фиг. 470.

Планшайба станка вращается двигателем через зубчатую передачу. От того же вала через посредство целого ряда промежуточных передач осуществляется как подача резца, так и перемещение рукоятки шунтового реостата двигателя с помощью медленно вра-

*) См. примечание на стр. 354.

щаемого особого распределительного диска, по которому катится ролик повозотно-укрепленного рычага, связанного с рукояткой реостата. Число оборотов распределительного диска и его очертания, очевидно, должны быть так подобраны, чтобы осуществить требуемые пределы регулировки и ее плавность.

3) Выбор рода и типа электродвигателя. До сих пор говорилось большей частью о применении к металлообрабатывающим станкам шунтовых электродвигателей постоянного тока, как наиболее приспособленных для широкой и плавной регулировки.

Наличие городских и районных центральных электрических станций переменного тока, обслуживающих металлообрабатывающие заводы, *) и стремление к упрощению эксплуатации и удешевлению

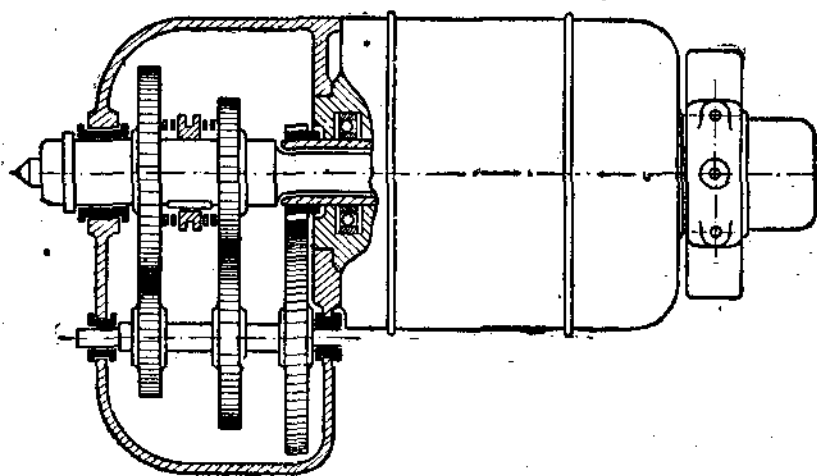
силового оборудования заставляют применять для привода указанных станков обычные асинхронные двигатели трехфазного тока. Однако применение последних, упрощая эл. хозяйство завода, несомненно влечет за собой ухудшение регулировочных свойств станка или усложнение его конструкции. Вопрос о применении коллекторных двигателей переменного тока является до сих пор окончательно неразрешенным, поскольку ни с точки зрения коммутационных свойств, ни с точки зрения стоимости они не могут конкурировать не только с асинхронными двигателями, но даже

и с шунтовыми двигателями постоянного тока. (Подробнее см. главу о выборе тока.) Исходя из этих соображений и имея в виду весьма ограниченное применение коллекторных двигателей к металлообрабатывающим станкам, в дальнейшем, при сравнении различных систем приводов, ограничим его двигателями постоянного тока и трехфазными асинхронными. В большей своей части металлообрабатывающие станки не обладают значительными маховыми массами; кроме того пуск двигателей обычно производится или на холостой шкив контр-привода, или на вал станка, поэтому с точки зрения пусковых условий возможно применение короткозамкнутых двигателей, имеющих и лучший к. п. д., и лучший $\cos \phi$, нежели двигатели с контактными кольцами. Применение же пуска переключением обмотки статора со звезды на треугольник устраняет крупный недостаток указанных двигателей в отношении пусковых токов. Что касается регулирования скорости асинхронных двигателей, то наиболее целесообразным в данных условиях работы является способ переключения обмоток статора на различное число полюсов. Обычно в таких случаях двигатель также выбирается короткозамкнутым, с тем чтобы не делать переключений роторной об-

*) Машиностроительные заводы, в противоположность бумажным, сахарным, химическим, текстильным, не являются потребителями производственного мягкого пара, экономически оправдывающего постройку собственной электрической блок-станции.

мотки. Из двух типов регулируемых асинхронных двигателей: 1) с несколькими обмотками на статоре, подключаемыми попеременно к сети, и 2) с одной обмоткой на статоре, но имеющей целый ряд выведенных концов, переключением которых получается несколько ступеней скорости двигателя, — наиболее подходящим с точки зрения к. п. д. и стоимости является второй тип.

Такие двигатели имеют 2—4 ступени, что и является достаточным для станков, не требующих плавной регулировки; большее же число ступеней значительно усложняет конструкцию самого двигателя, а также и переключающего приспособления.



Фиг. 471.

Стремление приблизить двигатель к рабочему органу станка в целях увеличения к. п. д. привода и упрощения манипуляций со станком заставило станкостроительные фирмы выпускать специальные конструкции станков, в которых двигатель является неотъемлемой составной частью. Примером подобного выполнения являются токарные станки со специальным двигателем на шпинделе (Spindelstockmotor), шлифовальные станки с короткозамкнутым двигателем, ротором которого является кольцо, окружающее цилиндрический статор и несущее на себе шлифовальный круг; станки с фланцевыми двигателями, пристраиваемыми непосредственно на коробке скоростей; ручные электросверла, электропилы, электроверетена прядильной машины и т. д.

Схема привода шпинделя, снабженного так называемым „шпиндельштокмотором“, указана на фиг. 471. Сам двигатель имеет полый вал, вращающийся на шариковых подшипниках. Сквозь полый вал проходит шпиндель станка, несущий кулачковую муфту, расположенную между двумя зубчатками, свободно насаженными на шпиндель. Перемещая кулачковую муфту в ту или иную сторону, сцепляют шпиндель станка с валом двигателя через зубчатый перебор с различным передаточным числом. Указанная конструкция дает

две ступени скорости. Если в качестве приводного двигателя применен шунтовой с широкой регулировкой, то, перемножая число контактов шунтового реостата на число механических ступеней, очевидно, получим общее число ступеней, которое может быть сделано достаточно большим ($z = k \cdot m$).

Конструкция шлифовальных кругов с непосредственным соединением ротора двигателя с кругом была дана на фиг. 285 (см. главу V). Что же касается фланцевых двигателей, то из конструкций, указанных на фиг. 264 главы V, для станков большей частью применяются 3 типа, а именно: тип В-5 с боковым щитком удлиненной конструкции, снабженным рядом отверстий в плоской своей части, прилегающей к кожуху станка. С помощью винтов или болтов, пропускаемых через указанные отверстия, двигатель крепится к станку. Так как размер отверстий, расположение и число их стандартизированы, то имеется возможность легкой замены одного двигателя другим, в чем и заключается главное преимущество подобных двигателей. Второй тип (В-10) фланцевых двигателей отличается от обычного типа двигателей лишь особым фланцем, составляющим одно целое со щитком двигателя. В остальном разницы между первым и вторым типом не имеется. И, наконец, третий тип (В-9) характеризуется отсутствием одного щитка, каковым является уже стенка перебора станка.

Стоимость первых двух типов фланцевых двигателей незначительно выше стоимости нормальных двигателей; двигатели же последнего типа, наоборот, несколько дешевле нормальных, поскольку в данном случае отсутствует один щиток, зато при этом удорожается сам станок, ибо он должен иметь лишнее гнездо с шариковым подшипником для вала двигателя.

4) Выбор электрического привода. Итак, выяснив в достаточной мере технические требования, которые предъявляются к приводу металлообрабатывающими станками, а также рассмотрев в общих чертах возможность и техническое оформление применения для них двигателей постоянного и переменного тока, перейдем к вопросу сравнения различных систем приводов.

Из всех металлостанков ограничимся в данном случае сравнением различных систем привода для токарных станков, так как метод сравнения может быть полностью применен и для других типов металлостанков, как-то: сверлильных, фрезерных, шлифовальных, карусельных и т. д.

Сравнение будем производить по тем основным статьям расхода, из которых составляется общий баланс рассматриваемой нами отрасли промышленности. Так, по данным ЦСУ на 1927/28 год расходы по металлообрабатывающей промышленности распределяются следующим образом:

1. Сырье и вспомогательные материалы	46%
2. Зарплата	36 „
3. Топливо и электрическая энергия	5 „
4. Амортизация	4 „
5. Прибыль и прочее	9 „

Итого . . . 100%

Расходы по п. 1 являются независимыми от конструкции привода и изменяют свою величину лишь в случае изменения других статей расхода. Все остальные статьи в той или иной мере зависят от рода электропривода. На зарплате больше всего отражается производительность станка и его конструкция, так как простота конструкции станка и всего привода влечет за собой уменьшение квалификации обслуживающего лица. Расход на электрическую энергию также зависит от конструкции привода, и, наконец, расходы по амортизации и погашению капитала зависят от стоимости привода и станка в целом.

Следовательно, сравнение приводов сводится в основном к выявлению:

- 1) производительности,
- 2) расхода энергии и
- 3) стоимости.

1. а) О влиянии электрического регулирования на производительность станка выше было сказано достаточно: род станка определяет характер регулирования и, следовательно, род двигателя и род тока; например, из металлостанков крупные станки и станки с плавным изменением диаметра обточки преимущественно электрифицируются постоянным током.

Вместо регулирования скорости резания для увеличения производительности можно, казалось бы, увеличить сечение снимаемой стружки при той же скорости резания. Но, как известно, наивыгоднейшие скорости резания обычно даются в сочетании с определенным соотношением между глубиной резания и подачей. Увеличивать одновременно ту и другую не всегда представляется возможным: этому мешают конструкция подающего устройства, заданные размеры и т. д.

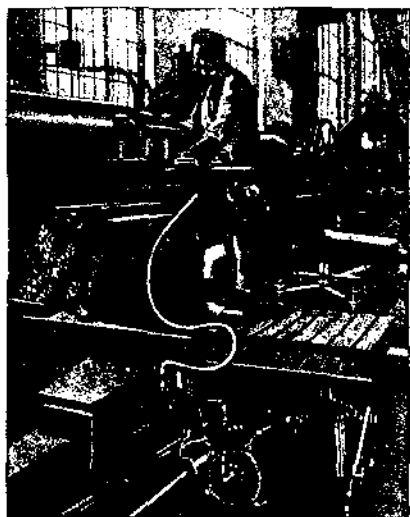
Изменением же соотношения между подачей и глубиной резания можно в значительной мере увеличить расход энергии и износ резца, т. е. уменьшить время между заточками резца. Сказанное подтверждается опытами Клопштока („Die Werkstattstechnik“, 1923, стр. 645), согласно которым при одном и том же сечении стружки, но при разных соотношениях глубины резания и подачи (например при глубине резания 2 мм и подаче 10 мм и, наоборот, при глубине резания 10 мм и подаче 2 мм), получаются необходимые мощности для снятия стружки в первом случае 6 kW, во втором 9 kW, что, несомненно, должно отразиться на стоимости выпускаемой продукции.

б) Значительную роль в отношении производительности станка играет также и способность электропривода поддерживать мощность на шпинделе станка постоянной. Передача ремнем дает при уменьшении скорости ремня значительное уменьшение передаваемой станку мощности. Особенно это заметно на станках со ступенчатым шкивом. В то время как число оборотов контрпривода обычно является постоянным и почти постоянным остается усилие, передаваемое единицей ширины ремня, величина скорости последнего изменяется в значительных пределах, а следовательно, примерно в этих пределах изменяется и передаваемая от контрпривода мощность:

$$P = \frac{P \cdot b \cdot v}{102 \cdot 60} \text{ kW}, \quad (337)$$

где p — усилие в кг, передаваемое от контрпривода 1 см ширины ремня, b — ширина ремня в см, v — скорость ремня в м/мин.

Таким образом при переводе ремня с меньшего диаметра шкива станка на больший на шпинделе станка получается минимальная мощность, что как раз противоречит требованию, так как при малых оборотах шпинделя обычно стараются взять стружку значительных размеров. Это обстоятельство и послужило одной из причин того, что новейшие приводы станков конструируются без ременных передач, с использованием лишь зубчатых переборов; в последнем случае мощность на шпинделе станка понижается только на величину потери в переборе, при введении лишней зубчатой передачи; при хорошем выполнении зубчаток, работающих в масляной ванне, а в особенности в случае применения регулируемого двигателя постоянного тока, уменьшающего число механических ступеней, эти потери не превышают 5% на каждую пару зубчаток, уменьшающую скорость на 200—500%.



Фиг. 472.

с) Время, затрачиваемое на различные прямые и вспомогательные операции со станком, двигателем и передачами, как-то: пуск, остановка, реверс, изменение скорости резания и т. д., точно так же отражается на производительности станка. Продолжительность этих манипуляций („Griffzeiten“, фиг. 481) играет значительную роль даже с чисто психологической точки зрения, а именно: если привод станка требует, например, для изменения скорости резания сложных манипуляций с различными рычагами перебора, отнимающих значительное время для обдумывания и выполнения, то обслуживающее лицо избегает вообще пользоваться ими и в ущерб производительности работает на скоростях, не соответствующих наивыгоднейшим. Наоборот, на станках, снабженных кнопочным *) управлением, изменение скорости и другие операции занимают настолько незначительное время и настолько сами по себе просты (нажатие кнопки, находящейся обычно под руками рабочего, см. фиг. 472), что рабочие охотно пользуются ими. Для того чтобы охарактеризовать в этом отношении различные электроприводы, приведем таблицу 142 опытных средних данных о расходе времени на манипуляции, связанные с изменением числа оборотов шпинделя токарного станка. Время манипуляции на станке со ступенчатым шкивом и зубчатым перебором в обоих случаях одинаково (24,05 сек.), так

*) О схемах кнопочного управления см. далее, выше, стр. 236 — 242.

ТАБЛИЦА 142.

Тип привода станка	Время манипуляций с остановкой станка		Время манипуляций без остановки станка	
	сек.	%	сек.	%
Станок со ступенчатым шкивом и зубчатым перебором	24,05	100	24,05	100
Станок с двигателем трехфазного тока с переключаемым числом пар полюсов	4,76	19,8	0,59	2,4
Станок с фланцевым двигателем постоянного тока . .	2,88	12,0	0,63	2,6
Станок с двигателем на шпинделе станка	2,16	8,9	0,63	2,6

как сюда включено и время, идущее на манипуляции с перебором, требующим при перемене скорости полной остановки станка. В пределах регулирования электродвигателя отпадает манипуляция с перебором станка, и время затрачивается только на перевод рукоятки реостата с одного контакта на другой при ручном управлении или на нажатие кнопки при электрическом управлении.

Таблица 142 и фиг. 473а составлены на основании исследований фирмы Сименс-Шуккерт над целым рядом идентичных токарных станков, высотой центров 200—250 мм, с различным электроприводом, и дают средние цифры из нескольких десятков измерений. Некоторые неизбежные неполадки с ремнем при переводе его на контрприводе с меньшего шкива на больший (соскакивание) естественно отразились на средней величине продолжительности манипуляций на станке со ступенчатым шкивом.

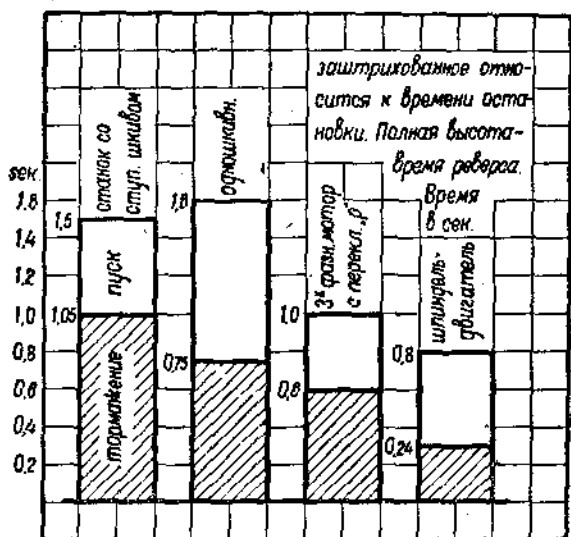
При нарезке винтов на токарных станках является необходимость быстрой и точной остановки станка. Этому требованию лучше всего удовлетворяет привод от двигателя постоянного тока с применением торможения замыканием якоря на сопротивление. Для подобных двигателей мощностью 2—3 kW время торможения не превышает 0,2 сек., в то время как для станков со ступенчатым шкивом оно больше секунды.

На фиг. 473б нанесено время торможения и пуска тех же токарных станков с различным электроприводом. Вполне понятно, что станок со ступенчатым шкивом, более легкий, чем с зубчатым перебором, тормозится дольше, но пускается скорее.

Станок с регулируемым двигателем постоянного тока останавливается особенно быстро на электродинамическом торможении (замыканием двигателя накоротко).

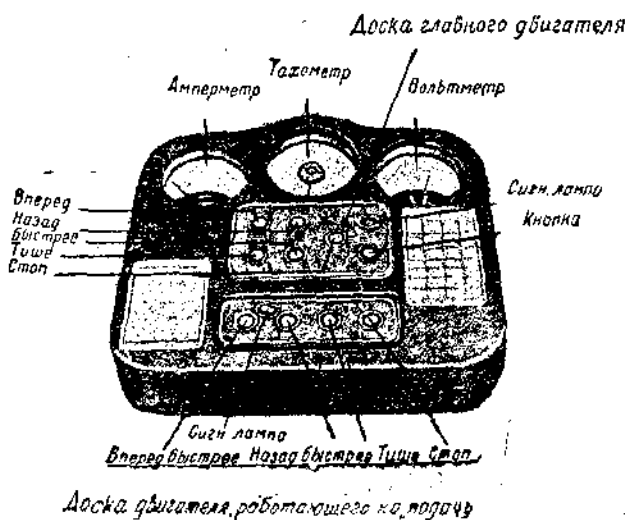
Чтобы яснее представить удобства, связанные с управлением на расстоянии помощью одного нажатия кнопки и с чрезвычайно простым контролем работы станка помощью измерительных приборов (амперметра, вольтметра и тахометра), на фиг. 474 показан переносный пульт управления в исполнении фирмы Заксенверк.

носными (как на фиг. 472) и соединяются гибким кабелем с ящиком. В этом ящике (фиг. 476а и 476б) собраны пусковые реле,



Фиг. 473 б.

реостат регулировки скорости и вспомогательный моторчик, вводящий или выводящий реостат под влиянием „реле скорости“; по-



Доска двигателя, работающего на подч

Фиг. 474.

ческим путем, с расстояния. Понятно поэтому, что станок, кроме главного электродвигателя мощностью 60 kW с регулировкой $R=3,5:1$, имеет 11 вспомогательных двигателей мощностью от 0,5 kW до 6,5 kW и 4 тахометридинамо для указания скоростей.

следние включают моторчик в ту или другую сторону при нажатии кнопок с надписями „быстрее“ или „медленнее“.

д) До сих пор приводы сравнивались с точки зрения расхода „машинного“ времени. Однако значительная часть общего времени, затрачиваемого на производство той или иной детали падает на вспомогательные манипуляции, т. е. на время установки детали на станке, промеры, перестановки детали и т. д.

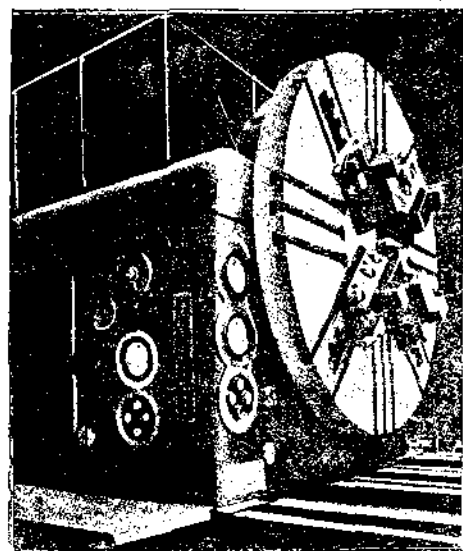
Уменьшение продолжительности этих операций, очевидно, увеличит производительность.

Время, идущее на установку и перестановку детали на станке, зависит от наличия транспортных средств, например кранов, подвесных электрических тележек и т. д., которые могут быть широко применены только при отсутствии трансмиссий.

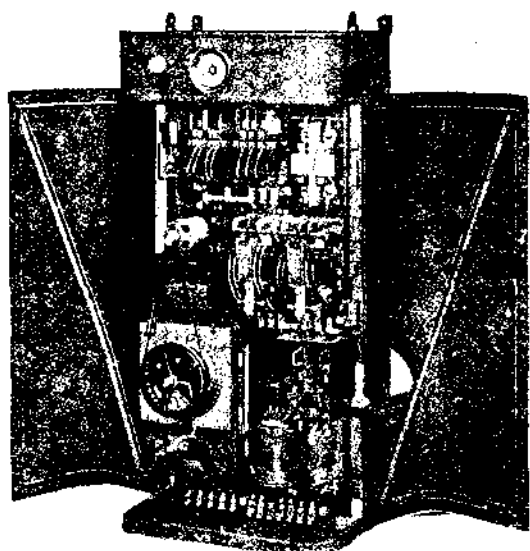
Равным образом трансмиссионный привод заставляет располагать станки не по ходу производства, а по длине трансмиссионного вала, что также не может не отразиться на производственном процессе.

Две схемы расположения станков при групповом и одиночном приводе наглядно подтверждают сказанное (фиг. 477). По данным зарубежных фирм, экономия места при одиночном приводе составляет в среднем около 20%, как видно из сравнения верхней заштрихованной площади, занятой станками трансмиссионного привода, с нижней — одиночного.

е) Отсутствие ремней и различных трансмиссионных



Фиг. 475.



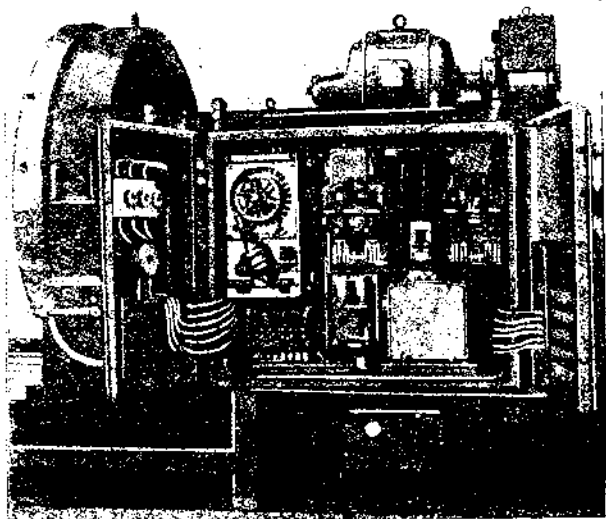
Фиг. 476а.

приспособлений дает возможность улучшить общее освещение мастерской (ср. фиг. X и фиг. XI во введении). Фиг. 478 дает представление о влиянии освещенности на производительность

рабочего. По оси ординат здесь отложена производительность в процентах, а по оси абсцисс — освещенность. Если при освещенности в 25 люксов производительность принять за 100%, то при освещенности в 100 люксов производительность увеличится на 100%. При наличии ремней большая освещенность дает лишь более резкие тени от ремней, колеблющиеся при работе и утомляющие зрение. Наконец, лучшая освещенность ведет к уменьшению количества несчастных случаев.

Итак, в отношении производительности одиночный привод дает явное преимущество по всем рассмотренным выше пунктам.

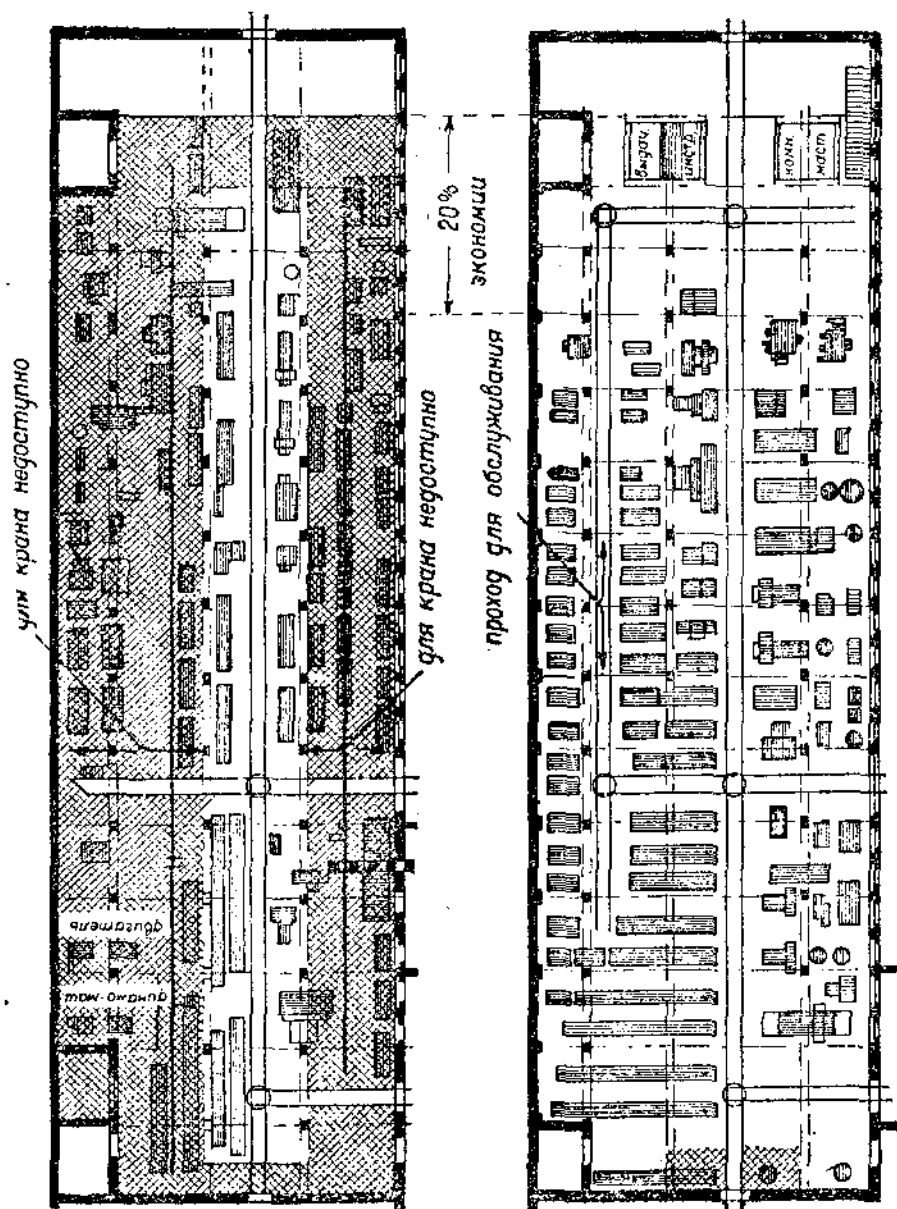
2. При сравнении различных приводов по расходу энергии обычно исходят из удельного расхода энергии, т. е. расхода на единицу веса снимаемой стружки. Если считать, что полезный расход энергии будет одним и тем же на станках с различным приводом, то разница в расходе энергии будет обуславливаться лишь потерями в станке, передающем механизме и в источнике двигательной силы. Следовательно, при рассмотрении этого вопроса прежде всего приходится сталкиваться с к. п. д. самого станка. К сожалению, этому вопросу до настоящего времени мало уделялось



Фиг. 476б.

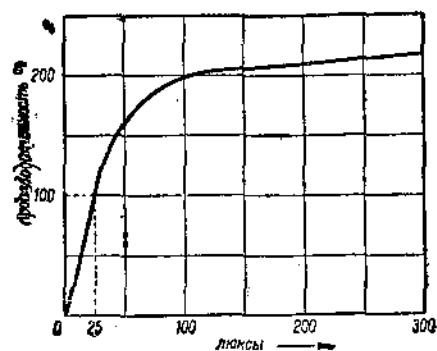
внимания, и в очень редких случаях можно узнать величину к. п. д. станка. К тому же коэффициент этот не остается постоянной величиной при различном числе оборотов шпинделя, а изменяется в довольно широких пределах. Но если к электродвигателям предъявляются определенные требования в отношении величины к. п. д. и характера его изменения в функции нагрузки, то последовательно было бы те же требования предъявлять и к станкам, как таким же преобразователям энергии, используемой при резании. По аналогии с двигателями, потери в станке можно распределить на постоянные и переменные, зависящие от нагрузки. Соотношение между теми и другими, как известно, отражается на характере изменения к. п. д. в зависимости от нагрузки. У станков с большими постоянными потерями (30% всей подводимой энергии) и малыми переменными (10%) кривая к. п. д. получается очень пологой (кривая II, фиг. 479), и, наоборот, у станков с большими

переменными (30%) и малыми постоянными потерями (10%) кривая к. п. д. обладает большей крутизной в пределах малых нагрузок (кривая I, фиг. 479). Очевидно, далеко не безразлично в отношении

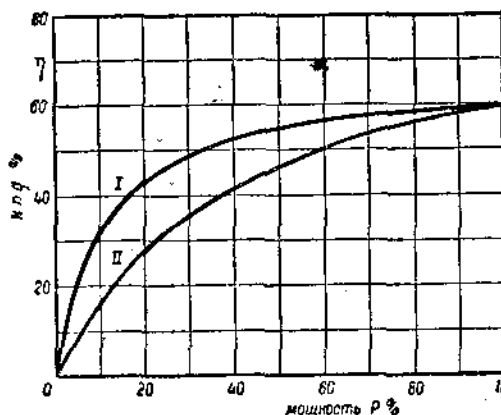


расхода энергии иметь станок с кривой к. п. д. I или II, несмотря на то, что к. п. д. обоих станков при номинальной мощности одинаков. (Конечно, могут встретиться и такие станки, которые при одинаковых размерах имеют различный к. п. д. при номинальной

мощности и в то же время различные формы кривых к. п. д.) При рациональном использовании станков указанное обстоятельство

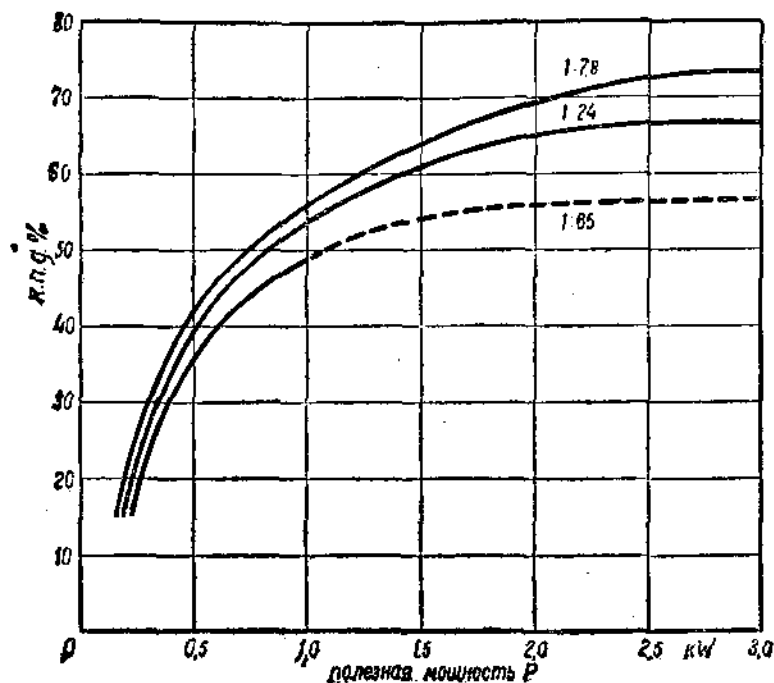


Фиг. 478.



Фиг. 479.

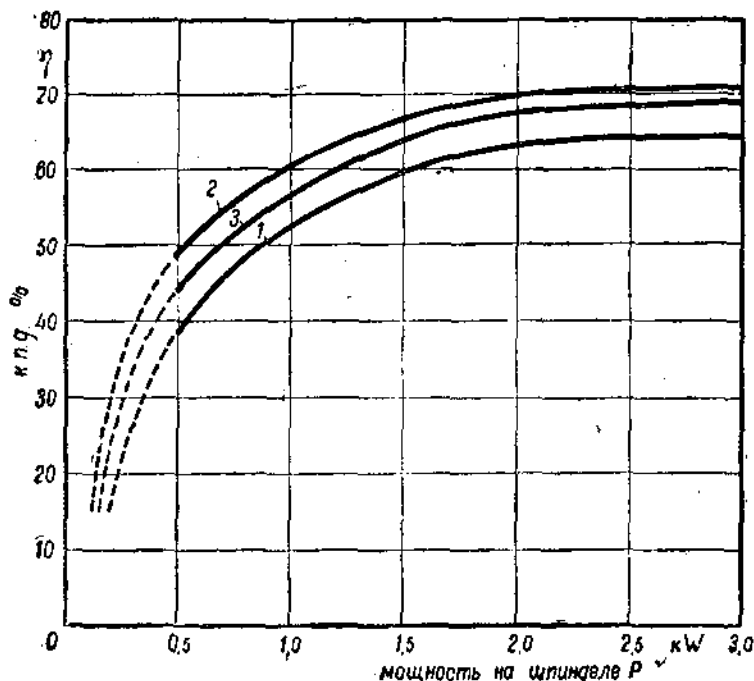
должно быть учтено, и наряды на работы надо распределять по станкам, руководствуясь не только их размерами, как это имеет



Фиг. 480 а.

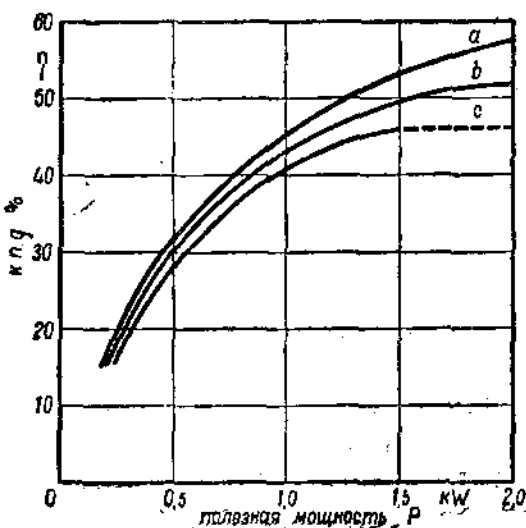
место в большинстве случаев, но также и кривыми к. п. д. станка. Последние могут быть легко получены с помощью нажима Прони.

На фиг. 480 а, 480 б и 480 с приведены кривые к. п. д. станков, предназначенных для привода от двигателя на шпинделе станка



Фиг. 480 б.

(шпиндельштокмотора), от фланцевого асинхронного двигателя и от трансмиссии со ступенчатым шкивом. Каждая кривая относится к определенному передаточному числу. Наилучшим к. п. д. обладают станки, сконструированные для привода от фланцевого двигателя, а также от двигателя, насаженного на шпиндель станка.



Фиг. 480 с.

Так как кривые к. п. д. двигателей обычно являются известными, то нетрудно перейти к к. п. д. привода и к общему к. п. д. установки, приняв к. п. д. промежуточных передач за постоянные величины для станка со ступенчатым шкивом, что хотя не имеет места в действительности но допустимо, если принять во внимание, что в данном

случае существенно выявить не абсолютные, точные значения этих коэффициентов, а только относительные.

Говорить о к. п. д. привода станка, присоединенного к трансмиссионному валу, затруднительно, так как к потерям в станке, контрприводе, промежуточных передачах от трансмиссионного вала к контрприводе и от последнего к станку необходимо прибавить и часть потерь в подшипниках трансмиссионного вала, также в самом двигателе. По отношению к трансмиссионному приводу можно говорить лишь о средних значениях к. п. д. привода станка или же, что чаще всего практикуется, о к. п. д. вообще всего трансмиссионного привода в целом.

Все приведенные выше кривые получены для того случая, когда привод используется в той же мере, как и сам станок. Обычно же у станков, управляемых не со стороны двигателя, имеется дополнительный расход энергии на холостой ход двигателя и промежуточных передач, так как последние в паузах между рабочими процессами не отключаются. Несомненно, это обстоятельство ухудшает общий к. п. д. привода, в особенности трансмиссионного, и тем больше, чем меньше „коэффициент включения“ ϵ , т. е. отношение времени действительной работы станка за одну смену к общей продолжительности смены.

Итак, на основании вышеизложенного и анализа потерь в групповом и одиночном приводах, приведенного в начале

главы, можно утверждать, что одиночный привод новейшей конструкции в отношении расхода энергии имеет значительные преимущества по сравнению с групповым приводом. Это преимущество увеличивается особенно сильно при уменьшении коэффициента включения ϵ и коэффициента загрузки η_z .

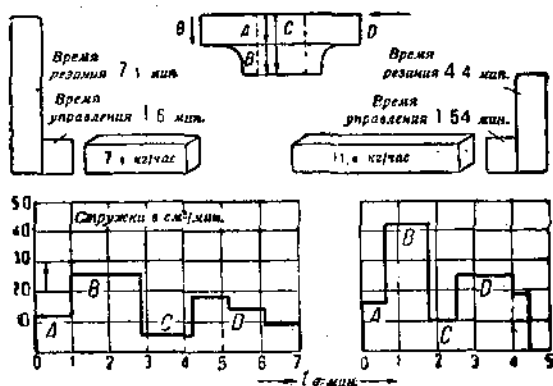
В заключение небезынтересно привести цифры удельного расхода энергии, т. е. расхода, приходящегося на единицу веса снимаемой стружки, полученные в опытных мастерских завода Сименс-Шуккерт.

При работе на токарном станке с двигателем на шпинделе (Spindelstockmotor) удельный расход энергии составлял для определенных условий работы 0,07 kWh/kg.

При тех же условиях работы на станке со ступенчатым шкивом 0,208 kWh/kg.

Кроме того на фиг. 481 приведен график такого же сравнения расхода энергии и времени на станке старой и новой конструкции, взятый из книги инж. Меллера „Электрический одиночный привод“.

Увеличение расхода энергии почти в три раза должно быть объяснено не только лучшим к. п. д. первого станка, но также



Фиг. 481.

и быстротой обработки, так как на этом станке можно было работать со скоростью резания более близкой и наивыгоднейшей.

3. Наконец переходим к последнему пункту сравнения различных систем привода токарных станков, а именно к стоимости того и другого привода.

К сожалению, при разрешении этого вопроса придется пользоваться данными зарубежных фирм, имея в виду, что большинство новейших конструкций токарных станков, со специальным двигателем на шпинделе, фланцевым двигателем и т. п. не изготавливаются на заводах СССР. Данные табл. 143 о стоимости токарных и других станков (считая 1 герм. марку = 0,70 руб.) взяты из предложений фирм G. Böhrringer, H. Wohlenberg и Magdeburger Werkzeugmaschinenfabrik по отношению к станкам с высотой центров 250 мм и расстоянием между центрами около 2 м и по своей абсолютной величине несколько отличаются от данных К. Meller и O. Pollok.

Как уже неоднократно указывалось выше, нельзя ограничиваться одним лишь сравнением стоимости электрического оборудования станков, поскольку электрический привод станка очень часто обуславливает конструкцию его, что, несомненно, отражается на стоимости станка.

ТАБЛИЦА 143.

Стоимость токарных станков с различными приводами, включая и электрическое оборудование.

Станок с электродвигателем на шпинделе	Станок с фланцев. двигателем		Станок со ступенч. шкивом	
	Постоянного тока (регулируемым)	Переменного тока с переключением полюсов	С одиночным двигателем	С приводом от трансмиссии
5 250	4 830	4 900	4 060	3 450

В стоимость станка со ступенчатым шкивом для случая привода от трансмиссии вошла стоимость двигателя, реостата, моторного ящика, трансмиссионного вала, контрприводов, ремней и т. д., приходящихся на один станок.

Как видно из таблицы, наибольшая стоимость токарного станка получается при условии привода от специального шпиндель-двигателя и наименьшая — от трансмиссии. Разница между ними составляет примерно 50%.

Другая картина получается, если перейти к годовым расходам по каждому отдельному приводу.

Здесь несомненно необходимо учесть, кроме процентных отчислений на амортизацию и погашение капитала, также и расходы по ремонту и монтажу оборудования *).

*) Многие авторы, как, например, К. Меллер, при этом сравнении учитывают также и стоимость помещения, приходящегося на один станок (неодинакового для группового и одиночного привода), и предлагают здесь же приблизительно учесть и

В табл. 144 даны годовые расходы по каждому станку с учетом отчислений на амортизацию и погашение капитала, которые в общем составляют 20% от стоимости оборудования и монтажа. Монтаж для первых трех станков принят равным 5%, а для станков со ступенчатым шкивом 10%.

ТАБЛИЦА 144.

Тип привода	Станок с двигателем на шпинделе	Станок с фланцевым двигателем		Станок со ступенчатым шкивом	
		Постоянного тока регулир.	Переменного тока с перекл. полюсов	С одиночным двигателем	С приводом от трансмиссии
Стоимость станка	5 250	4 830	4 900	4 060	3 450
монтажа	206	240	245	406	845
Итого . . .	5 510	5 070	5 145	4 466	3 795
Амортизация и погашение капитала	1 102	1 014	1 029	893	759
Ремонт и эксплуат. расходы (с ним связанные) Ремни	55 —	50 —	51 —	45 15	38 35
Итого годовые расходы . . .	1 157	1 064	1 080	953	832

Уменьшение расхода на ремни в приводе станка со ступенчатым шкивом от отдельного двигателя по сравнению с трансмиссией объясняется меньшей длиной. Не имея опытных данных утверждать, что ремонт и связанные с ним расходы будут меньше у станков с одиночным приводом, как это делают некоторые авторы*), принимаем эти расходы одинаковыми для всех станков и равными 1% стоимости оборудования и монтажа. Из сопоставления цифр табл. 144 видно, что разница между годовыми расходами по станкам со „шпиндельштокмотором“ и с приводом от трансмиссии меньше, чем в случае сравнения стоимости только одного станка.

увеличение производительности станка. Однако, имея в виду, что кубатура помещения, приходящегося на один станок, зависит не только от рода привода, но также и от целого ряда других причин (например от примененного вида транспорта), и считая, что введение этих дополнительных расходов затемило бы лишь сущность разрешаемого вопроса, рациональнее от учета указанных расходов в данном случае отказаться.

*) Л и в и ц, Одиночный и групповой привод станков в механических мастерских „Известия ГЭТа“, 1929, № 12.

Сравнивая трансмиссионный станок со станком, имеющим французский регулируемый двигатель постоянного тока, не уступающим в отношении производительности станку, снабженному „шпиндельшток-мотором“, видим, что разница в годовых расходах по ним составляет только $\frac{1064 - 832}{823}$, т. е. около 28%. Перерасход по указанным в табл. 144 статьям при одиночном приводе компенсируется, как это видно из предыдущего, увеличением производительности и уменьшением расхода энергии по сравнению с приводом от трансмиссии.

§ 10. Общее сравнение систем электрического привода.

Итак, выяснив в достаточной мере производственные или технические требования, предъявляемые к приводу в связи с механическими свойствами двигателя, подведем теперь итоги всем преимуществам одиночного привода, как „экономическим, так и техническим, связанным и не связанным с электродвигателем.

Первые, т. е. чисто экономические, преимущества констатируются в следующих отношениях:

I. В отношении зданий, которые при отсутствии тяжелых трансмиссий могут быть соответственно легче и дешевле.

II. В отношении привода, который имеет лучший механический к. п. д. в среднем за год вследствие:

1) меньшего количества передач;

2) лучшего к. п. д. передач, находящихся в лучшем состоянии под постоянным контролем амперметра, так как его показание при холостом ходе служит единственным верным показателем состояния передач и самого станка;

3) отсутствия потерь на холостой ход трансмиссий и контр-приводов при остановках станков, весьма значительных при малом значении коэффициента η_p , особенно при сверхурочных работах.

Вторые, т. е. технические или производственные, преимущества группируются вокруг трех основных требований, трех „китов“, на которых зиждется современная организация производства; а именно:

I. Плотность работы — Arbeitsdichte.

II. Быстрота работы — Arbeitsschnelle.

III. Доброкачественность работы — Arbeitsgüte.

I. Увеличение плотности достигается при одиночном приводе лучшим использованием помещений благодаря тому, что станки, свободные от всякой связи с трансмиссией, располагаются на основании двух соображений: правильного хода предмета обработки и наилучшего использования площади помещений.

Две схемы расположения станков при групповом и одиночном приводе наглядно подтверждают сказанное (фиг. 477). Экономия места, даваемая свободным расположением станков одиночного привода, составляет, как уже сказано, около 20%.

II. Быстроте работы при одиночном приводе содействуют:

1) Прежде всего большая „плотность“ работы и правильный кратчайший путь предмета обработки.

2) Широкая механизация и электрификация транспорта, возможная лишь при отсутствии потолочных трансмиссий, что видно из двух разрезов тех же мастерских фиг. 482 и фиг. X и XI Введения.

3) Более совершенное использование мощности станка путем поддержания наивыгоднейших скоростей обработки помощью плавной регулировки.

4) Упрощенное управление станком помощью кнопочной системы (Druckknopfsteuerung), или даже совершенно автоматической, еще более увеличивающей маневренную способность станка.

5) Использование двигателя как тормоза для ускорения остановки станка.

6) Отсутствие вынужденных перерывов в работе всей мастерской при повреждении группового электродвигателя или трансмиссии.

III. Улучшению качества работы при одиночном приводе способствуют:

1) Прежде всего, как выяснено выше на конкретном примере прядения (фиг. 451), точная и автоматическая регулировка, которую электродвигатель вносит в одиночный привод.

2) Лучшее освещение и отсутствие колеблющихся теней от движения ремней.

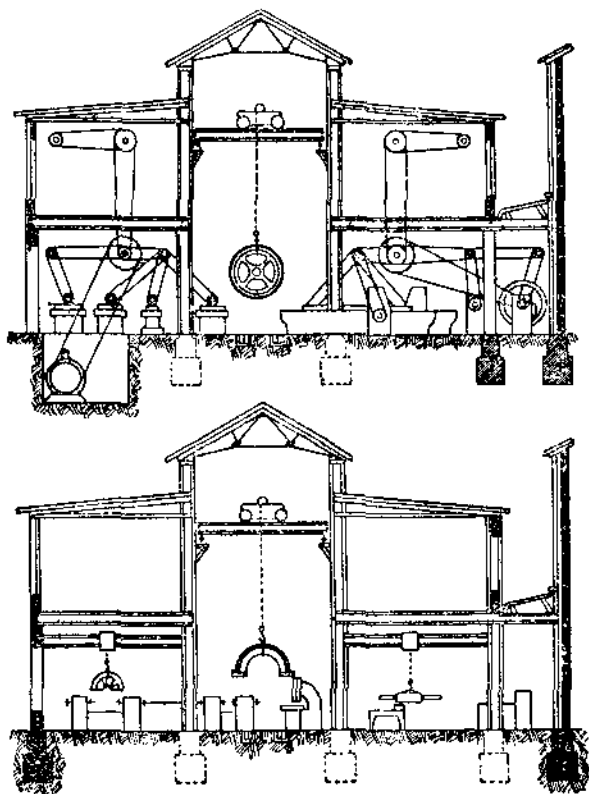
3) Отсутствие пыли, подвимаемой ременными передачами, и капания масла с потолочных подвесок, — обстоятельство, особенно существенное в таких производствах, как ткацкое, ситцепечатное, красильное, бумажное и т. п.

4) Ровный ход машины, не перебиваемый ударной работой соседних, что не вполне достигается в групповом приводе даже при эластичной ременной передаче.

В противовес изложенным многочисленным достоинствам одиночного привода недостатков его можно указать немного, притом исключительно экономического, а не производственного характера:

1) Более высокая стоимость электрического оборудования.

2) Большая стоимость ухода и ремонта (оспариваемая).



Фиг. 482.

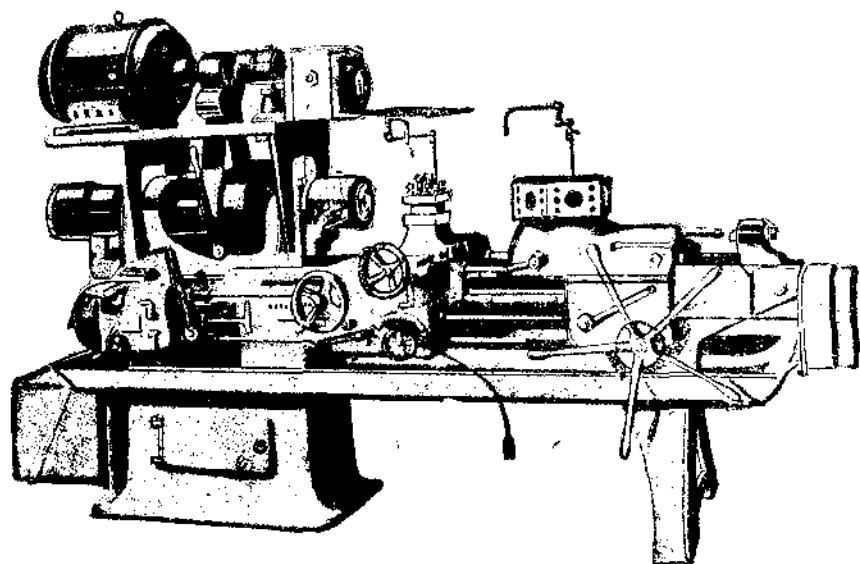
3) Худший к. п. д. электродвигателей.

4) Более низкий коэффициент мощности.

Последние два фактора особенно могут быть чувствительны при неравномерной нагрузке машин, когда в среднем двигатели оказываются сильно недогруженными.

Как уже выше сказано, об этих экономических недостатках не стоило бы говорить по сравнению с производственными достоинствами, если последние могут быть реально использованы.

Поэтому такой вопрос всегда должен быть поставлен и особенно тщательно обсужден при электрическом переоборудовании существующего завода; никоим образом не следует



Фиг. 483.

задаваться предвзятым суждением о непригодности существующего группового привода.

Последний оказывается особенно уместным, если в переоборудываемом заводе:

1) технологический процесс не требует регулировки скоростей;
2) станки работают с малым коэффициентом простоя, т. е. с высоким коэффициентом η_g ;

3) станки по преимуществу однотипные и

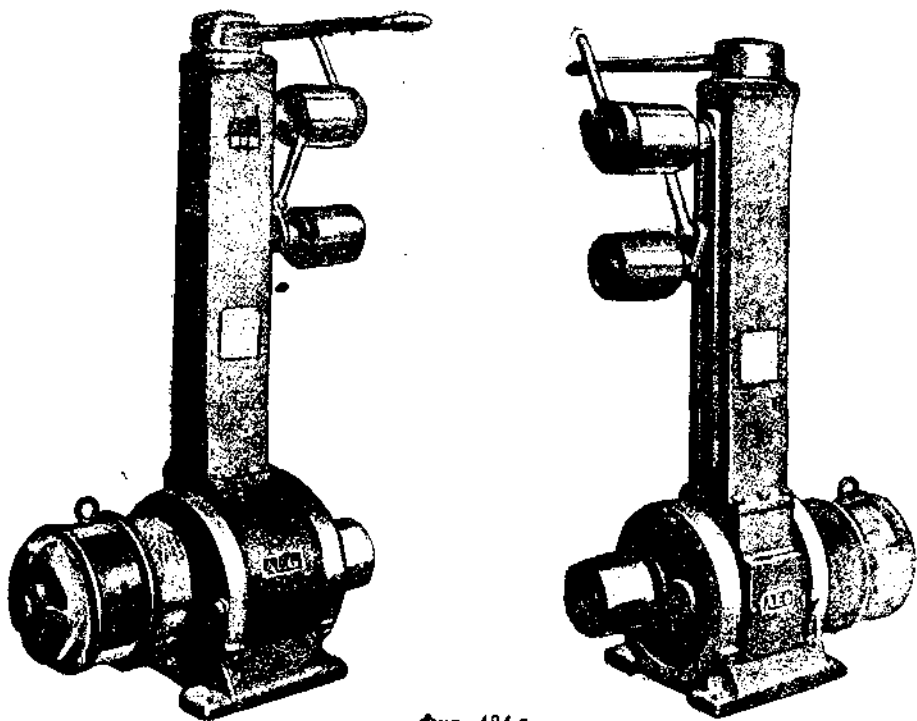
4) обладают большим пусковым „инерционным“ сопротивлением, значительно превышающим нормальное, как, например, лесопильные рамы, прядильные мюль-селефакторы, вращающиеся печи, шаровые мельницы и т. п.

Этот последний фактор особенно влияет на ухудшение к. п. д. и коэффициента мощности двигателей одиночного привода и на увеличение пусковых потерь. *)

*) См. последнюю главу о коэффициенте мощности.

При выборе группового привода особое внимание надо обратить на правильный подбор количества и рода станков, при возможном удовлетворении технических требований, что достигается составлением возможно большего количества вариантов (пример см. „Электричество“, 1915, стр. 365).

Во всяком случае при переоборудовании существующего завода на одиночный привод следует всячески избегать пользоваться старыми контрприводами, сохраняя лишь минимальное количество



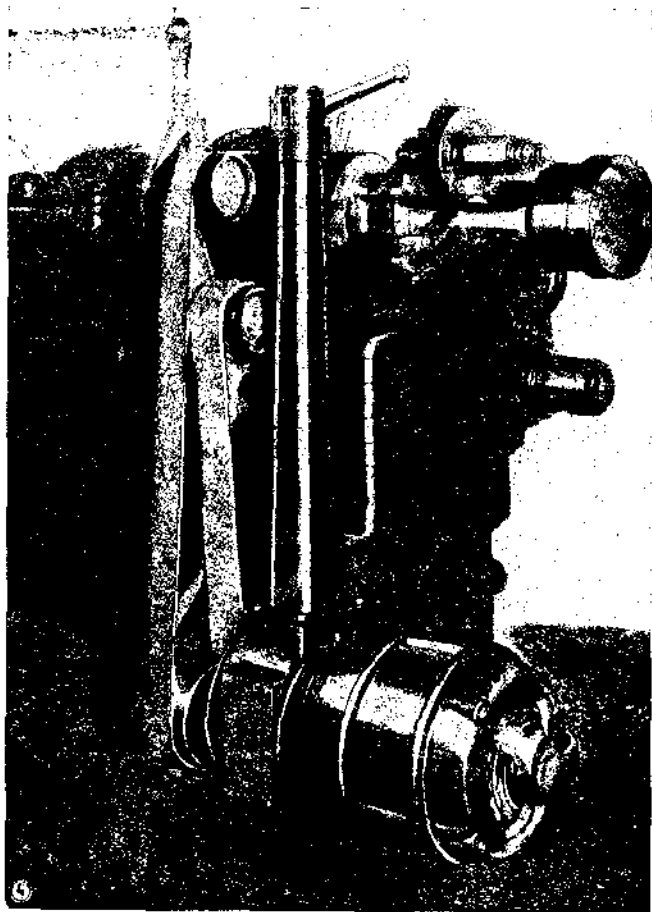
Фиг. 481 а.

сменных зубчаток и широко используя электрическую регулировку. В журнале „Werkstattstechnik“ (1921, Н. 4, стр. 81) приводится ряд примеров такого переоборудования.

На фиг. 483 представлено переоборудование старого револьверного станка завода Шухард Шютте, с контрприводом на современное устройство помощью шунт-мотора с регулировкой $R_m = 4$. Двигатель установлен на специальной раме из уголкового железа, привертываемой к станку, и соединяется ремнем с несколько уширенным шкивом (115 mm), заменившим ступенчатый шкив. В виду незначительного расстояния применен нажимной ролик „Леникс“. Ремень при этом не мешает доступности подшипников и двух сохранных сменных зубчаток, не показанных на чертеже. Управление регулировкой, пуском и электрическим торможением сосредоточено в ящике на правой стороне станка и производится маховичком, сидящим на суппорте, через распределительный валик.

Автоматический пусковой реостат установлен в станине слева. Нет никаких препятствий к применению на таких станках „кюлочного“ управления.

Чтобы приспособить старые станки со шкивами для одиночного привода, фирмы „Всеобщая компания электричества“ (AEG)



Фиг. 484 b.

и Сименс-Шуккерт выпустили специальные типы двигателей (фиг. 484a) со ступенчатыми зубчатыми передачами, с передвигными роликами „Леникс“ на специальной стойке и с рукояткой управления скоростями, возвышающейся над стойкой на такой высоте, чтобы рабочий мог ею пользоваться, не нагибаясь (фиг. 484b) и не сходя с своего места. Размеры их см. фиг. 484c и табл. 145, 146 и 147.

Фирма AEG имеет специальный каталог Pt. Bl. G. 6/1015 (июнь 1930 г.) этих специальных передач AEG — Norm-Motor-Stufengetriebe типа NWSM с 2, 3, 4, 6 и 9 скоростями (это число механических ступеней скорости указывается в знаменателе марки, например NWSM = 30/9).

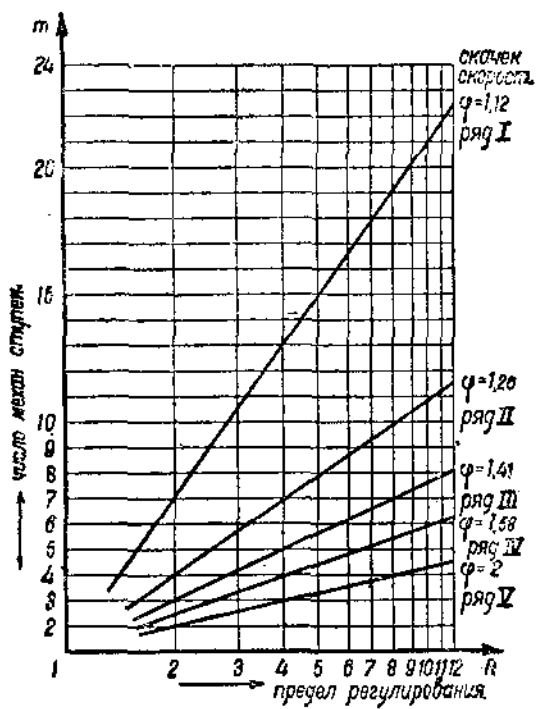
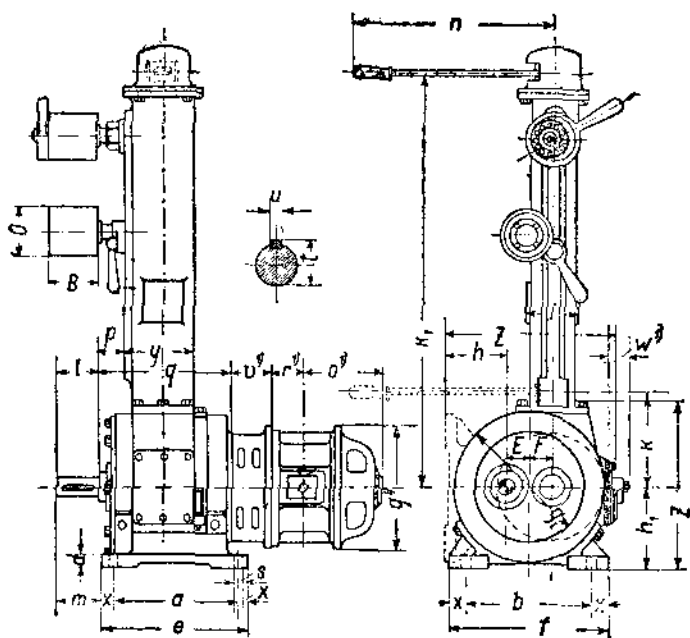


ТАБЛИЦА 145.

Тип передачи АЕГ		Размеры в мм (по фиг. 484с)																										
		a	b	c	d	e	f	g ₁	h	h ₁	i	k	k ₁	l	m	n	p	q	s	t	u	x	y	z	E	F	D	B
NWSM = 2,5/2	NWSM = 2,5/3	260	230	25	25	300	270	280	120	161	120	220	1100	80	80	550	65	280	15	28	8	20	140	320	41	40	100	100
NWSM = 3/2	NWSM = 3/3	270	270	25	30	320	320	330	125	184	120	245	1125	80	80	550	65	300	15	33	8	25	140	370	59	—	100	100
NWSM = 3,5/2	NWSM = 3,5/3	300	310	30	35	360	370	380	150	210	130	280	1100	120	125	550	65	330	18	34	10	30	180	420	60	—	130	140
NWSM = 5/2	NWSM = 5/3	340	410	35	50	400	470	485	195	270	130	330	1150	120	125	550	65	380	18	54	14	30	180	520	75	—	130	140

ТАБЛИЦА 146.

Тип передачи АЕГ		Размеры в мм (по фиг. 484с)																									
		a	b	c	d	e	f	g	h	h ₁	l	k	k ₁	l	m	n	p	q	s	t	u	x	y	z	E	D	B
NWSM = 30/2	NWSM = 30/3	300	270	25	30	350	330	330	250	185	120	245	1 125	80	80	350	65	330	15	33	8	25	140	370	59	100	100
NWSM = 35/2	NWSM = 35/3	330	310	30	35	390	370	380	295	215	130	280	1 100	120	125	550	65	380	18	38	10	30	180	430	60	130	140
NWSM = 50/2	NWSM = 50/3	360	410	35	50	420	470	480	371	270	130	330	1 125	120	125	550	65	405	18	54	14	30	180	540	75	130	140
NWSM = 60/2	NWSM = 60/3	480	500	40	60	560	580	580	440	320	170	410	1 100	170	170	550	85	545	22	65	18	40	230	630	100	160	180

ТАБЛИЦА 147.

Тип передачи AEG		Размеры в мм (по фиг. 484с)																									
		a	b	c	d	e	f	g ₁	h	h ₁	i	k	k ₁	l	m	n	p	q	r	s	t	u	x	y	z	E	D
NWSM = 30/4	NWSM = 30/6	300	270	25	30	350	320	330	250	185	120	245	125	80	88	550	65	330	15	33	8	25	140	370	65	100	100
NWSM = 35/4	NWSM = 35/6	330	310	30	35	390	370	380	295	215	130	280	100	120	125	530	65	380	18	38	10	80	180	430	80	130	140
NWSM = 50/4	NWSM = 50/6	360	410	35	50	420	470	480	371	270	130	330	125	120	125	550	65	405	18	54	14	30	180	540	101	130	140
NWSM = 60/4	NWSM = 60/6	480	500	40	60	560	580	580	440	320	170	410	100	170	170	550	85	545	22	65	18	40	230	630	120	160	180

Передачи предназначаются для фланцевых трехфазных двигателей типа В-9, т. е. без бокового щитка и без ножек. Двигатели могут быть с переключением полюсов, и тогда число скоростей соответственно увеличивается.

Для выбора величины этой „комплектной передачи“ „Norm-getriebe“ служит отношение $\frac{P}{n}$, где P — мощность двигателя в л. с., а n — наименьшее число оборотов на последнем валу передачи, т. е. отношение, пропорциональное вращающему моменту $M = 975 \frac{P}{n}$.

Скачок скорости φ (Stufensprung) от одной ступени к другой может быть выбран 1,12; 1,26; 1,41; 1,58 или 2 и образует пять рядов.

Например:

по первому ряду могут быть получены: 1,06 — 1,2 — 1,35 — 1,5 — 1,7 — 1,9 — 2,15 — 2,4 — 2,7 — 3 — 3,8 — 4,25 — 4,8 — 5,4 — 6 — 6,8 — 7,5 — 8,5 — 9 об/мин и т. д. или 120, 135, 150, 170, 190 об/мин;

по второму ряду: 1,2 — 1,5 — 1,9 — 2,4 — 3,0 — 3,8 — 4,8 — 6 — 7,5 9,5 — об/мин или 120, 150, 190 или 1200, 1500, 1900 и т. д.

по третьему ряду: 1,06 — 1,5 — 2,15 — 3 — 4,25 — 6 — 8,4 — 12 — 17 — 24 — 34 — 48 — 68 — 95 — 135 — 190 — 270 — 380 — 540 — 750.

по пятому ряду: 1,5 — 3 — 6 — 12 — 24 — 48 — 95 — 190 — 380 — 750 или 15 — 30 — 60 — 120 или 150 — 300 — 600 — 1200.

Связь между желаемым пределом регулировки $\mathfrak{R}$, скачком скорости φ и числом ступеней m по „VDW-Richwerten“ представлена на диаграмме (фиг. 485).

В каталоге приводятся специальные номограммы для выбора передачи. На фиг. 486 представлена номограмма для типа NWSM с передаточным числом до $u = 5$ и пределом регулирования до $\mathfrak{R} = 5$.

Пример. Мощность 7,5 л. с. при 1500 об/мин. Наименьшее число оборотов — 350 об/мин; $\mathfrak{R} = 2$; $m = 3$.

По диаграмме VDW (фиг. 485) для $\mathfrak{R} = 2$, $m = 3$ подходит ряд III со скачками скорости $\varphi = 1,41$, дающий три скорости: 380, 540 и 750 об/мин.

Так как $u = \frac{1500}{580} = 3,95$, то по номограмме (фиг. 486) находим необходимую величину передачи NWSM-3,5/3, идя от оси абсцисс (от точки a , соответственно $n_{\min} = 380$ об/мин) до пересечения с линией мощностей (7,5 л. с.) в точке b и затем к оси ординат — точка c .

Если бы $n_{\min} = 190$ об/мин, то $u = \frac{1500}{190} = 7,9$, и выбор передачи пришлось бы сделать, пользуясь другой аналогичной номограммой (фиг. 487).

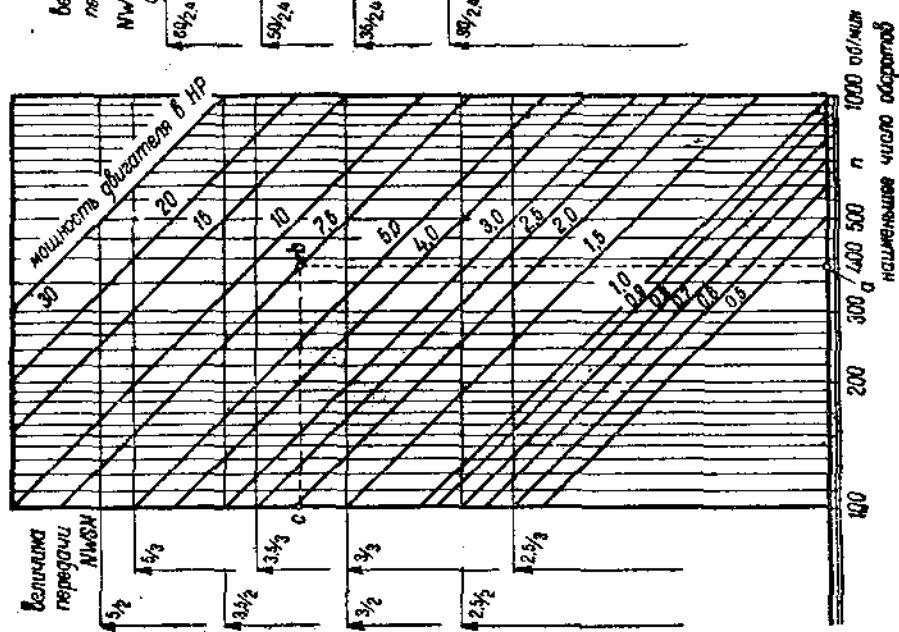
Стоимость передач (без двигателя и масла) можно видеть из табл. 148.

Для достижения возможной компактности электропривода старых станков от обыкновенных двигателей со шкивами можно

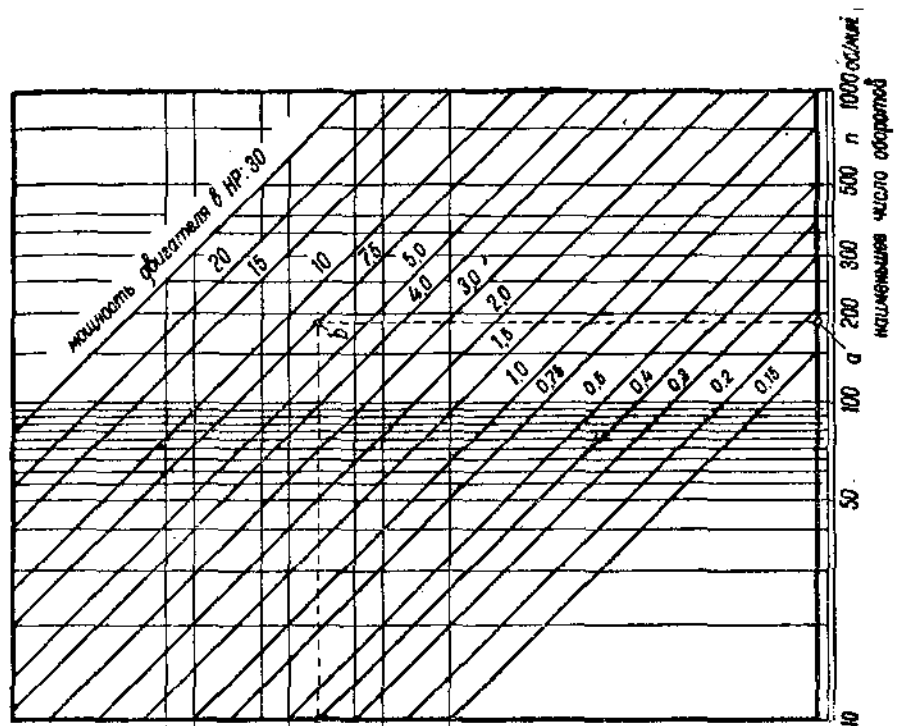
Величина и стоимость комплектных передач типа „Norm“ 4 NWSM фирмы AEG.

Предел по- люе число	Предел по- люе число	Тип NWSM	$\frac{P}{n}$	Тип NWSM	$\frac{P}{n}$	Стоимость в марках *			Наибольш. допуст. диаметр фланца двигателя „G“ в мм
						Без стойки	Со стойкой	Со стойкой и двумя роликками	
n = 5	Z = 5	2,5/2	0,008	2,5/3	0,006	595	665	805	300
		3/2	0,015	3/3	0,015	693	765	900	350
		3,5/2	0,030	3,5/3	0,025	792	872	1 030	400
		5,2	0,060	5/3	0,050	950	1 030	1 210	450
n = 15	Z = 5	30/2	0,015	30/3	0,015	792	862	1 000	250
		35/2	0,030	35/3	0,025	912	990	1 150	300
		50/2	0,060	50/3	0,050	1 130	1 210	1 385	350
		60/2	0,120	60/3	0,100	1 510	1 625	1 845	500
n = 15	Z = 10	30/4	0,015	—	—	872	990	1 130	250
		35/4	0,030	—	—	980	1 100	1 260	300
		50/4	0,060	—	—	1 220	1 360	1 535	350
		60/4	0,120	—	—	1 630	1 765	1 980	500
n = 15	Z = 10	30/6	0,015	—	—	900	1 020	1 160	250
		35/6	0,025	—	—	1 015	1 135	1 295	300
		50/6	0,050	—	—	1 265	1 405	1 580	350
		60/6	0,100	—	—	1 680	1 820	2 035	500
n = 15	Z = 10	30/9	0,015	—	—	950	1 070	1 210	250
		35/9	0,025	—	—	1 090	1 210	1 366	300
		50/9	0,050	—	—	1 356	1 500	1 675	350
		60/9	0,100	—	—	1 805	1 940	2 160	500

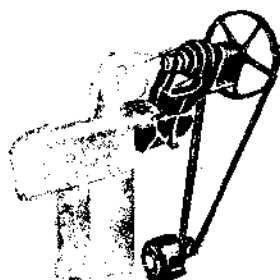
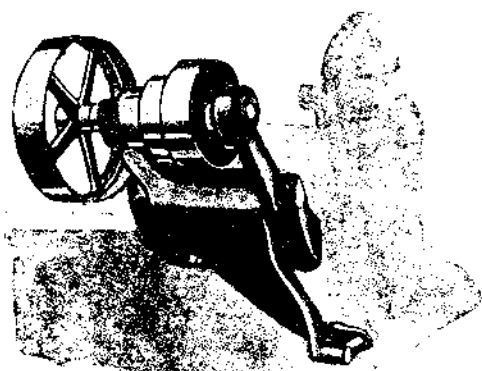
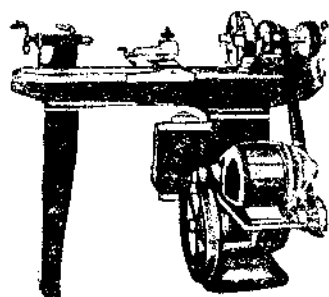
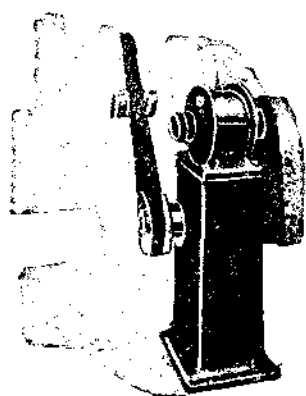
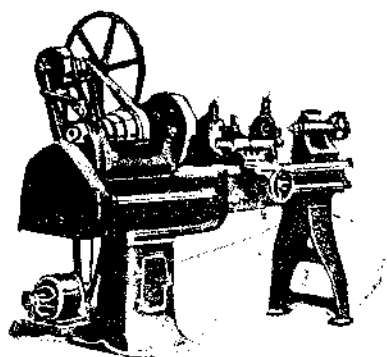
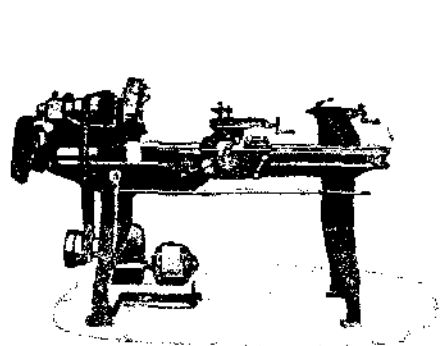
* Стоимость в германских марках без двигателя и без мотора. При переводе в рубли 1 марка = 85 коп. (с учетом поправки).



Фиг. 486.



Фиг. 487.



Фиг. 488.

рекомендовать, кроме указанной на фиг. 483 установки двигателя над станком (над ступенчатым шкивом) на особой железной конструкции, установку двигателя сбоку на особой плите, подвешиваемой к плите станка на шарнирах, причем натяжение ремня достигается собственным весом двигателя (см. фиг. 488 внизу справа). Остальные эскизы фиг. 488 дают представление о возможных способах компактной установки двигателей к старым станкам, рекомендуемых в каталогах зарубежных фирм. Однако в виду недостаточности расстояний между шкивами без нажимного ролика „Леникс“ в таких случаях не удастся обойтись.

За последнее время организованное при Научно-исследовательском секторе Лен. отд. ВЭО Бюро электроприводов разработало целый ряд компактных конструкций приводов, применительно к старым станкам; конструкции эти, выполняемые в виде рабочих чертежей, осуществляются на нескольких ленинградских заводах.

ГЛАВА IX.

ВЫБОР СИСТЕМЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ.

В предыдущей главе самым конкретным образом выявилась тесная взаимосвязь всех звеньев силового фабрично-заводского хозяйства (генерирование, электропередача, т. е. сеть, электродвигатель, механическая передача, машина-орудие, производственный процесс), и было констатировано общее положение, что замыкающее звено этой цепи (т. е. технологический процесс) должно быть положено в основу выбора всех остальных. Следовательно, в проектировании силового потока надо идти как раз обратно его естественному направлению, т. е. от машины-орудия к электростанции.

Таким образом и в данном случае самое намечение вариантов системы тока должно базироваться на требованиях производства, и только такие „технологически обоснованные“ варианты получают право на дальнейшее более полное экономическое сравнение.

Высказанное основное положение тем более уместно повторить здесь, что выбор тока и напряжения, к сожалению, чаще всего рассматривается как самодовлеющая задача, вне всей цепи звеньев, и здесь наиболее укрепился трафарет: род тока более связывается с величиной предприятия, чем с характером его, и, таким образом, выбор производится с точки зрения передачи энергии сети, т. е. промежуточного звена, а не замыкающего.

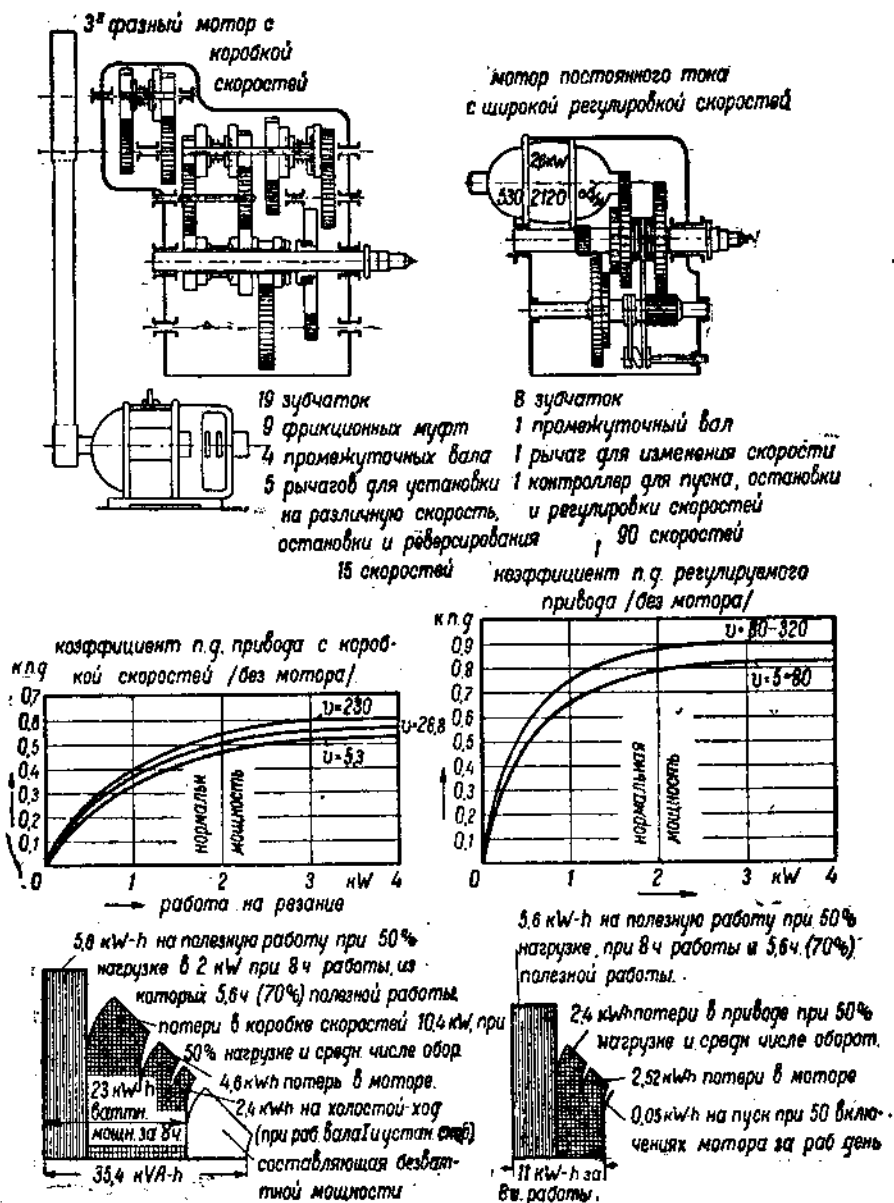
Во избежание этой несомненной ошибки в дальнейшем вопрос выбора рода тока и напряжения рассмотрим отдельно и начнем по степени важности с выбора тока, а не напряжения, не забывая, конечно, их тесной связи.

§ 1. Выбор системы тока.

Определяющими его факторами являются:

- 1) помимо основного фактора, а именно производственного процесса, иначе говоря, характера работы станков (пуск, регулировка скорости и т. п.), еще нижеследующие:
- 2) род привода, неразрывно связанный с первым фактором, как выяснено в предыдущей главе;
- 3) условия производства в смысле окружающей среды (влажности, пыли и пр.);
- 4) характер обслуживания;
- 5) наличие районной сети и существующая система тока на заводе;
- 6) район обслуживания — фактор, играющий крупную роль лишь при отсутствии особых требований производства (п. 1 и 2).

Можно считать достаточно выясненным в предыдущей главе, что оба первых фактора неразрывно связаны между собой и что



Фиг. 489.

выбор рода тока на основании их определяется, собственно говоря, выбором наиболее подходящего рода двигателя.

1) Механические свойства двигателей (пуск, регулировка, торможение и т. п.) были достаточно подробно разобраны, и потому, если

производство предъявляет к ним какие-либо определенные требования, то выбор рода двигателей, а вместе с тем и выбор рода тока не представят затруднений.

Наиболее определенное и существенное требование, как мы видели в предыдущей главе, есть требование возможно широкой, плавной и экономичной длительной регулировки скорости.

Можно ли это условие считать определяющим род тока?

а) Из тех сравнений различных двигателей, которые выше приводились, следует вывести заключение, что переменный ток не может экономически конкурировать с постоянным, если не считать коллекторных двигателей переменного тока, которые не уступают в указанных качествах, но не выдерживают конкуренции в цене и к. п. д., как увидим далее.

б) Если же сравнивать привод требующего длительной регулировки станка от асинхронного или широко регулируемого шунтового двигателя постоянного тока, то сравнение переходит в плоскость сравнения механической регулировки в первом случае с электрической — во втором.

В добавление к сказанному в предыдущей главе, приведем здесь только результат испытаний таких приводов, произведенных заводом AEG в Германии на переменном и постоянном токе.

Испытания эти показали (фиг. 489), что расход энергии при установке на трехфазном токе в среднем на 110% более, чем на постоянном токе, а при учете безваттной мощности даже до 220—235% (в kVA).

ТАБЛИЦА 149.

Привод	Предел регулировки Σ_m	Число ступеней	Скачок скорости φ	Падение производительности $\Delta A\%$	Число оборотов шпинделя	Скорость резания	Подача mm	Ширина стружки mm	Диаметр обработ. предмета		Расход энергии kW. sec	$\cos \varphi$	Перерасход в %								
									D_1 mm	D_2 mm											
Постоянный ток 220 V 6,3 л.с. 560—1680 об/мин.	365	$4 \times 20 = 80$	1,057	5,4%	4,6	20,3	0,54	10,4	140	1263	0,55										
	4,6				13,3						0,59										
	= 80				42,8						0,58										
					127,0						0,76										
					356,0						2,08										
					46,0						2,57										
Трехфазный ток 190 V 7,6 л.с. 965 об/мин	274	16	1,28	22%	6,6	21,1	0,58	11	140	1261	1,32	0,38	140%								
	6,6				13,5						1,45	0,43									
	= 41,5				35,3						1,47	0,42									
					117,0						1,72	0,49	126%								
					172,0						2,12	0,57									
					274,0						3,00	0,68									
													48,0						4,67	0,81	82%

Указанные цифры получены при работе станка со средним коэффициентом загрузки $\eta_p = 0,5$ при 30% (по времени) холостой работы, потребной для установки, центровки, обмеров, смены инструмента

и скоростей, подачи и т. п., что заметно отзывалось на установке переменного тока, так как на это время из работы выключался станок, но не двигатель. Этот последний недостаток нельзя считать неотъемлемо принадлежащим приводу переменного тока.

Кроме того необходимо отметить, что установка с асинхронным двигателем позволяла получать только 15 различных скоростей, а замена его регулируемым двигателем постоянного тока дала возможность получить 90 скоростей при одновременном сокращении числа зубчаток.

Характерны в этом отношении цифры, даваемые инж. О. Pollok в его статье „Abkürzung des Arbeitszeit und Verminderung des Kraftbedarfs durch Reguliermotoren“.

В табл. 149 приводятся сравнительные испытания работы одного и того же станка на постоянном токе с регулированием мотора в пределах 3:1 (реостат с 20 контактами) и коробкой скоростей в 4 ступени, а на трехфазном токе без электрической регулировки, но с коробкой скоростей в 16 ступеней.

Цифры очень показательны. Применение трехфазного двигателя вызывает перерасход энергии: при холостом ходе 120—140% и при полной нагрузке — 82%.

с) Теперь перейдем к сравнению широкорегулируемых двигателей постоянного и переменного тока, а именно коллекторных. Последние не уступают двигателям постоянного тока в отношении весьма ценных свойств плавного и широкого регулирования скорости, которое может быть произведено в обе стороны от синхронной; при этом скорость двигателя практически остается независимой от колебания нагрузки.

Необходимо иметь в виду при сравнении, что шунтовые двигатели постоянного тока регулируются полем при постоянной мощности и падающем моменте вращения, что как раз и соответствует требованию металлообрабатывающих станков. Шунтовые же двигатели трехфазного тока (системы Шраге) регулируются сдвигом щеток при постоянном моменте (по крайней мере в пределах $\pm 25\%$ вверх и вниз от синхронизма) и, следовательно, для привода машин, требующих постоянного момента, а тем более растущего (вентиляторы), представляют преимущество перед двигателями постоянного тока, и с этой точки зрения сравнение проф. Шверда (см. табл. 149а) не выдерживает критики.

Однако экономически они не выдерживают конкуренции. Действительно, стоимость коллекторных двигателей значительно выше,^{*)} а к. п. д. их настолько ниже, что даже при наличии преобразовательной подстанции постоянный ток нередко оказывается выгоднее.

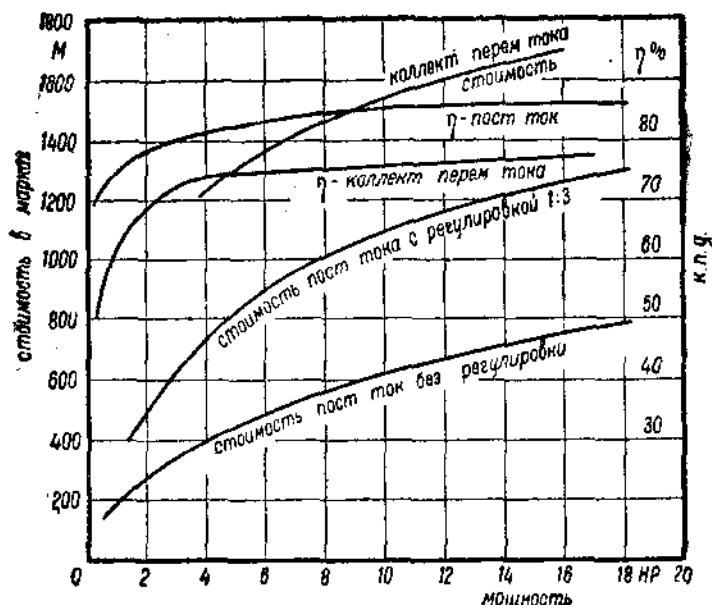
Чтобы иметь представление об этой разнице, ниже даны графики стоимости репульсионных двигателей и шунтовых постоянного тока, а также соответствующие кривые к. п. д. при работе с полной нагрузкой (фиг. 490).

^{*)} По данным проф. Шверда (Maschinenbau, 1925, Н. 16) коллекторные двигатели дороже двигателей асинхронных в 5 раз (см. табл. 149а), по данным различных фирм в 2—3 раза.

П о с т о я н н ы е			т о к 220 В		У р е ж а з н а й т о к	
Нормальный двигатель	Регулируемый на 50% вверх	Регулируемый на 200% вверх	Нормальный задвигатель		Шунтовой комлекторийный двигатель	
I. 1) Шунтовой двигатель G-6 $P = 2,5$ л. с. при 1420 об/мин. открытый тип со щитком 220 марок 2) Пусковой реостат с возм. ϕа. к-394—1 22 марок 3) Распределит. щиток S-292 и II к. 12 марок	Шунтовой двигатель G-6. $P = 2,5$ л. с. $n = 1410-2100$ об/мин. с неорм. обмоткой, дополн. пз-десами и встелог. комп. обмоткой (со щитком) 245 марок Регулировочный реостат с возм. ϕа. (на 30%) к-394—IV 40 марок То же—202 и II к. 12 марок	Шунтовой двигатель G-45 $P = 2$ л. с. $n = 950-2850$ об/мин (как предыд.) 330 марок Регулировочный реостат на 200%, инерт к-394—VIII 79 марок То же 12 марок	Асинхронный мотор R-51 $P = 2$ л. с., 1420 об/мин. открытый, коротк. замкнутый со щитком 137 марок Переключатель к-73—III—ш. с. 36 марок (Звезда—треугольник)	Шунтовой двигатель RDN-120—150 $P = 750; 1500; 2000$ $P = 1,85; 4,55; 8$ л. с., пуск и регулировка слиянием щеток 2280 марок Пусковой ящик с автомат. выключателем к-166—III—63-R-A 245 марок	Шунт. двигатель RDN-150 1500-б $P = 500; 1000; 1450$ $P = 3,5; 10,3; 12,8$ л. с. 3200 марок Пусковой ящик к-864—III—60 до 250 В 285 марок (То же до 500 В) 305 марок	Шунт. двит. RDN-160-100 $P = 500; 1000; 1450$ $P = 5,6; 16,3; 10,4$ 3670 марок Пусковой ящик к-864—III—60 до 250 В 285 марок до 500 В 305
II. 1) Шунтовой двигатель G-45 $P = 1420$ об/мин $P = 4,08$ л. с. (как предыд.) 315 марок 2) Реостат, как выше, 22 марок 3) Распределит. щиток 14,50 марок	Шунт. двит. G-45 $P = 4,08$ л. с. $n = 1420-2100$ об/мин Как выше 330 марок Регулировочный реостат к-394—X 67 марок То же 14,50 марок	Шунт. двигатель G-65 $P = 4,08$ л. с. (как выше) $n = 950-2850$ об/мин. 470 марок Регулировочный реостат к-394—X 160 марок То же 14,50 марок	R-71—1500 $P = 4,08$ л. с. $n = 1450$ об/мин 202 марок к-73—III—ш. с. 26 марок	Шунт. двигатель RDN-150 1500-б $P = 500; 1000; 1450$ $P = 3,5; 10,3; 12,8$ л. с. 3200 марок Пусковой ящик к-864—III—60 до 250 В 285 марок (То же до 500 В) 305 марок	Шунт. двит. RDN-160-100 $P = 500; 1000; 1450$ $P = 5,6; 16,3; 10,4$ 3670 марок Пусковой ящик к-864—III—60 до 250 В 285 марок до 500 В 305	Шунт. двит. RDN-160-100 $P = 500; 1000; 1450$ $P = 5,6; 16,3; 10,4$ 3670 марок Пусковой ящик к-864—III—60 до 250 В 285 марок до 500 В 305
III. 1) Шунт. двигатель GM-85 $P = 8,34$ л. с. $n = 1640$ (как выше) 475 марок 2) Пусковой реостат к-394—III 31 марка 3) Ящик { s-295 n—II к. } 25 марок	Шунтовой двигатель GM-105 $P = 9,79$ л. с. $n = 1200-1800$ об/мин. (как выше) 690 марок Регулировочный реостат к-394—X (76 марок Ящик { s-295 n—II к. } 25 марок	Шунтовой двигатель GM-145 $P = 5,52$ л. с. $n = 635-1905$ об/мин. (как I) 890 марок Регулировочный реостат к-394—XII 105 марок Ящик 25 марок	R-91—п—1500 $P = 1,7$ л. с. $n = 1440$ об/мин 360 марок к-73—V 34 марки (переплюска со звезды на треугольник)	Шунт. двит. RDN-160-100 $P = 500; 1000; 1450$ $P = 5,6; 16,3; 10,4$ 3670 марок Пусковой ящик к-864—III—60 до 250 В 285 марок до 500 В 305	Шунт. двит. RDN-160-100 $P = 500; 1000; 1450$ $P = 5,6; 16,3; 10,4$ 3670 марок Пусковой ящик к-864—III—60 до 250 В 285 марок до 500 В 305	Шунт. двит. RDN-160-100 $P = 500; 1000; 1450$ $P = 5,6; 16,3; 10,4$ 3670 марок Пусковой ящик к-864—III—60 до 250 В 285 марок до 500 В 305

ТАБЛИЦА 150.

Число станков *)	Электродвигатель, регулируемый без потерь	Мощность в kW		Перерасход при трехфазном коллекторном двигателе по отношению к двигателю пост. тока, включая стоимость преобразователя и потери в нем	
		Отдаваемая	Подведенная	На мощности в kW	На оборудовании в %
4	Пост. ток . .	41,7	(57,6) 61,27 **)	—	—
	Трехфазн. ток	41,9	61,8	(70%) 170% **)	65
7	Пост. ток . .	52,7	(72,2) 65,33 **)	—	—
	Трехфазн. ток	53,3	80,2	(100%) 18,50% **)	75
7	Пост. ток . .	76,7	(102,65) 93,73 **)	—	—
	Трехфазн. ток	74,5	105,4	(30%) 110% **)	67
7	Пост. ток . .	95,5	(125,62) 115,08 **)	—	—
	Трехфазн. ток	91,5	130,2	(3,50%) 11,80% **)	61



Фиг. 490.

*) Малое число станков взято умышленно не в пользу „постоянного тока“.

**) Цифры в скобках включают потери в преобразователе и трансформаторе при преобразовании переменного тока в постоянный.

По последним данным фирмы ASEA это соотношение цен, т. е. вдвое, сохраняется и для мощностей в 80—100 л. с. для шунтовых трехфазных коллекторных двигателей.

В названной выше статье инж. Pollok'a приведены данные сравнительного испытания группы станков с шунтовыми двигателями постоянного тока и репульсионными переменного (табл. 150), причем для постоянного тока взяты наиболее невыгодные условия, т. е. преобразование из существующего переменного тока при небольшом числе станков.

Если при трехфазном токе явится надобность в понизительных трансформаторах в силу того, что коллекторные двигатели не могут быть включаемы без них на высокое напряжение (свыше 300—500 V), то невыгоды такой установки скажутся еще резче.

Аналогичные выводы делает и инж. Buff в книге „Die Verwendbarkeit der Drehstromkommutatormotoren“. Из его подсчетов вытекает, что уже при установке более трех двигателей постоянного тока преобразование трехфазного тока становится выгодным.

Поэтому применение коллекторных двигателей находит себе место там, где имеется очень незначительное число регулируемых машин, разбросанных по различным мастерским.

d) Здесь следует упомянуть, что если применяется многопроводная система постоянного тока для получения регулировки скорости путем переключения двигателя на различные напряжения (например при электрическом оборудовании ситцепечатных машин), то коллекторные двигатели вообще не могут быть сравниваемы с двигателями постоянного тока, так как не могут дать требуемой степени регулировки.

e) Если по роду производства необходимо иметь станки, нуждающиеся в регулировке скорости либо в узких пределах, либо ступенями, то могут быть с успехом применены двигатели постоянного тока, и трехфазные с переключением числа полюсов (во втором случае), позволяющие экономно получать необходимые скорости.

Сравнение стоимости регулируемых фланцевых двигателей постоянного (табл. 151) и трехфазного тока с переключением полюсов (табл. 152) показывает, правда, преимущество последних (примерно в 1,6—2 раза дешевле), но если учесть грубость регулировки на трехфазном токе (только 2—3 ступени скорости) и низкий cos ϕ , то картина может измениться при всестороннем сравнении.

В табл. 153 дано сравнение стоимости фланцевых двигателей постоянного и трехфазного тока, причем стоимость первых поставлена в числителе.

Итак совершенно ясно, что характер требуемой регулировки, т. е. ее пределы и плавность (количественная и качественная сторона), определяет род двигателя и, следовательно, род тока.*)

2) Теперь на нескольких примерах покажем, как характер нагрузки или пусковых условий определяет род тока.

*) См. проф. Рикевич С. А., Применение постоянного тока в промышленности, т. II Трудов Всесоюзной конференции, 1932 г., по электрификации СССР (где, к сожалению, по техническим условиям большинство формул и некоторые рисунки пропущены) и доклад автора на I Областной энергетической конференции в Ленинграде на тему „Проблема постоянного тока в промышленности“.

ТАБЛИЦА 151.

Стоимость фланцевых двигателей постоянного тока (в германских марках и в процентах по отношению к нерегулируемым).

P_m kW	Предел регулирования R_m		
	1:1	1:2	1:3
0,5	235 марок 100%	$295 + 85$ марок $\frac{380}{235} = 160\%$	$390 + 155$ марок $\frac{545}{235} = 230\%$
1,1	305 марок 100%	$395 + 105$ марок $\frac{500}{305} = 165\%$	$500 + 173$ марок $\frac{673}{305} = 220\%$
3	405 марок 100%	$550 + 115$ марок $\frac{665}{405} = 165\%$	$720 + 380$ марок $\frac{1100}{405} = 270\%$

ТАБЛИЦА 152.

Стоимость фланцевых асинхронных двигателей с переключением полюсов (в германских марках и в процентах по отношению к нерегулируемым).

P_m kW	Предел регулирования R_m		
	Без переключателя 3000 об/мин	2 скорости 3000/1500 об/мин	3 скорости 3000/1500/1000 об/мин
0,5	125 марок 100%	220 марок $\frac{220}{125} = 175\%$	345 марок $\frac{345}{125} = 275\%$
1,1	145 марок 100%	260 марок $\frac{260}{145} = 180\%$	400 марок $\frac{400}{145} = 275\%$
3	240 марок 100%	370 марок $\frac{370}{240} = 160\%$	550 марок $\frac{550}{240} = 230\%$

ТАБЛИЦА 153.

Отношение стоимости фланцевых двигателей постоянного и трехфазного тока.

P kW	Предел регулирования R_m		
	1:1	1:2	1:3
0,5	$\frac{235}{125} = 1,8$	$\frac{380}{220} = 1,72$	$\frac{545}{345} = 1,6$
1,1	$\frac{305}{145} = 2,1$	$\frac{500}{260} = 1,92$	$\frac{675}{400} = 1,68$
3	$\frac{405}{240} = 1,7$	$\frac{665}{370} = 1,8$	$\frac{1100}{550} = 2,0$

Постоянный ток имеет некоторые преимущества при электрификации машин, имеющих ударную нагрузку (пресса, механические ножницы, молота и пр.). Как уже говорилось выше, в главе IV, за последнее время наблюдается стремление устанавливать эти машины без маховиков, чем достигается меньший расход энергии при холостой работе и устраняется опасность при авариях. В таком случае уравнивание нагрузки достигается применением шунтового двигателя со специальным регулятором, автоматически изменяющим скорость обратно пропорционально нагрузке.

Однако и при маховичном приводе желательная мягкость характеристики в целях использования живой силы маховика достигается весьма просто и экономично только в постоянном токе соответствующим компаундированием двигателя, в то время как в переменном токе она достигается либо специальными регуляторами скольжения с большими омическими потерями, либо путем применения довольно сложных схем регулирования Кремера, Шербиуса и т. д.

Наконец ценные свойства постоянного тока, а именно сериес- и компаунд-двигателей, выявляются в приводе кранов и транспортных приспособлений в виде больших пусковых моментов, а главное—автоматического увеличения скорости передвижения при малых грузах, что как раз и требуется условиями работы (например при подъеме крюка без груза). В результате расход энергии при сериес-двигателе окажется всегда меньше, чем при асинхронном, если поставить условием сравнения одинаковую продолжительность работы. Инж. Shiebler („Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft“, 1920) указывает, что трехтонный портовый кран имел одну и ту же производительность: с сериес-двигателем мощностью в 25 л. с. и асинхронным двигателем мощностью в 45 л. с., причем расход ваттной энергии у асинхронного двигателя был на 40% выше, чем у двигателя постоянного тока. $\cos \varphi$ трехфазного мотора при переменных условиях работы в среднем оказался равным 0,4, и вследствие этого сила тока в $3\frac{1}{2}$ раза более, чем у сериес-двигателя.*)

Почти те же соотношения мощностей (22 л. с. и 40 л. с.) имеют место на трехтонных порталных кранах Ленинградского торгового порта, где по исследованиям автора краны постоянного тока дали большую на 8% производительность и меньший на 12% расход энергии, чем аналогичные краны трехфазного тока (0,0205 kWh и 0,025 kWh на 1 тонну-метр горизонтальной проекции пути передвижения и подъема, или 0,0086 kWh и 0,0105 kWh на 1 тонну-метр действительного пути). Исследования заводских мостовых кранов дают средний расход энергии при подъеме 0,011—0,013

*) Интересные данные дает для портовых кранов инж. Oetterl (E. T. Z., 1924, № 16), сравнивая оборудование крана на 4 т с трехфазным асинхронным двигателем, однофазным репульсионным и сериесным—постоянного тока. При одной и той же производительности оказывается необходимым установить: в первом случае мотор мощностью в 95 л. с., во втором и третьем по 75 л. с. В результате детального подсчета этих трех оборудований оказалось, что расход энергии за один период работы (подъем и спуск груза, подъем и спуск крюка и поворот крана) составляет для трехфазного тока 2143,8 kW·сек, для однофазного—1917,12 kW·сек и для постоянного—1838,32 kW·сек.

kWh на 1 тонну-метр и 0,005—0,007 kWh — средний суммарный по всем трем двигателям.

По исследованиям подвесной электрической дороги в Лаборатории электроприводов Ленинградского Электротехнического института производительность тележки постоянного тока больше на 28% при одном и том же пути, грузе и водителе. (См. работу по исследованию электрической дороги в „Трудах Научно-исследовательского института протранспорта“, вып. II.)

В мостовых кранах при одинаковой производительности, по данным инж. Schiebeler'a, мощность серийных двигателей постоянного тока составляет: для подъема — 0,7, для передвижения тележки 0,8 и для передвижения моста 0,9 от мощности трехфазного асинхронного двигателя.

3) Переходя к условиям производства в отношении окружающей среды, необходимо указать, что в грязных и пыльных мастерских асинхронные двигатели, особенно с короткозамкнутым ротором, безусловно следует предпочитать двигателям постоянного тока, не говоря уже о производствах, вырабатывающих легко воспламеняющиеся или взрывчатые вещества, как, например, на мельницах, прядильных фабриках, пороховых заводах и т. п.

Сказанное относится всецело и к сырым или с кислотными парами помещениям, где короткозамкнутый двигатель имеет за собой все преимущества, так как обмотка его может быть легко изолирована от проникновения сырости, что делает возможным применение открытого типа, тогда как при постоянном токе, благодаря коллектору, двигатель должен быть закрытым.

4) Нередко при прочих равных условиях на выбор тока может повлиять и характер обслуживания двигателей. При большом количестве их и значительной разбросанности обслуживать двигатели приходится тому персоналу, который ведет производственную работу и часто, особенно при сезонных работах, является неквалифицированным.

Известно, например, что применение короткозамкнутых двигателей крупной мощности (в 50 kW и выше) на наших нефтяных промыслах вызывается как раз этими соображениями. То же относится к рудникам и к горнозаводским установкам. При этом даже в случае необходимости применить асинхронный мотор с кольцами закрытого типа его следует предпочесть закрытому двигателю постоянного тока, так как сводится к минимуму открывание смотровых крышек, крайне неудобное в этих специфических условиях, а в особенности при труднодоступных моторах (на кранах, роулгангах и т. п.).

Как обычное возражение против применения двигателей постоянного тока приводится хрупкость или ненадежность их. В этом отношении следует быть особенно осторожным при выборе электрического привода в производствах, не допускающих перерывов работы, например в металлургических заводах. Однако практика именно этих заводов в большинстве стран отдает предпочтение постоянному току для привода наиболее ответственных вспомогательных механизмов прерывистого режима (нерегулируемых, а регулируемых, конечно, тем более). Инж. А. С. Cummins (G. E. R., 1928, № 6) приводит историю постепенного совершенствования двигателя постоян-

ного тока в САСШ и результаты эксплуатации его на металлургических заводах за 8 лет—с 1920 по 1927 г., причем срок службы двигателя на 1 ремонт доведен до 20—25 месяцев, т. е. 1 ремонт в 2 года. Правда, и стоимость этих двигателей улучшенной конструкции (mill-type) почти в два раза выше нормальной, но двигатели постоянного тока не дороже трехфазных.

Аппаратура автоматического управления также работает надежнее на постоянном токе. *)

Надо заметить, что в Германии и в СССР большинство металлургических заводов оборудовано трехфазным током, которому, по-видимому, отдается предпочтение даже в приводах повторно-кратковременного режима работы. Сравнительная статистика ремонтов по Германии не в пользу постоянного тока; по СССР наблюдается разноречивость—по одному заводу за год исчислено 2,36 остановки по 1,33 часа на 1 двигатель постоянного тока и 1,35 остановки по 0,54 часа на 1 двигатель трехфазного тока, т. е. в 2,5 раза менее по времени, по другому заводу—1,89 ремонта на двигатель постоянного тока и 2,03 ремонта—трехфазного.

Имея в виду, что обследованные двигатели постоянного тока были более старыми и притом на 500 V вместо применяемых в САСШ на 230 V, что специальных типов ни Германия, ни СССР не имеют и что анализ рода ремонтов показывает надежную работу коллекторов, ремонт которых составляет лишь 6% от общего числа, можно с уверенностью, основанной на богатом и хорошо исследованном опыте САСШ, рекомендовать двигатели постоянного тока не только для регулируемых приводов, но и для имеющих повторно-кратковременный режим работы, где их ценные механические свойства (момент, торможение) обеспечивают большую производительность механизмов, в частности для кранов и тому подобных транспортных механизмов с возвратным движением вхолостую, о чем уже было сказано выше.

Все перечисленные факторы и являются главными в отношении выбора системы тока для фабрично-заводских предприятий при проектировании их заново или при переходе с существующего парового трансмиссионного привода на электрический.

5) Если же предприятие частично уже имеет электрический привод и возникает вопрос об электрификации остальных станков, то наличие определенной системы тока может оказать влияние на выбор ее при расширении; это влияние может быть даже решающим

*) По данным обследования в Ленинградском торговом порту, производимого инж. А. В. Фатеевым по заданию ЦНИВТ, наиболее уязвимой частью электрического оборудования являются аппараты управления, главным образом контроллеры, на ремонт которых падает в среднем 50% стоимости всех электроремонтов по крану. Это обстоятельство в сильной степени удорожает эксплуатацию установок на постоянном токе. При этих условиях подсчеты в области выбора рациональной системы тока для перегрузочных механизмов в портах показывают, что постоянный ток целесообразен при высоких стоимостях электроэнергии, выше 5—6 коп. за 1 kWh.

Смущаться этим, однако, не следует, так как крановая работа является одной из наиболее тяжелых для аппаратуры, и очевидно в этих случаях надо применять специальную аппаратуру, т. е. контроллеры кулачкового типа или контакторное управление, к которому за границей в массе и переходят.

Условия работы приводов большинства станков в отношении аппаратуры несравненно легче,

при отсутствии особых требований со стороны производства (см. выше, пп. 1 и 2).

Действительно, помимо экономических соображений, при наличии определенного тока громадную роль будет играть при выборе тока возможно большая простота и однотипность всей установки, крайне желательная с точки зрения удобства эксплуатации, о чем уже говорилось в § 10 главы V.

Ни стоимость, ни к. п. д. двигателей (без регулировки) не могут сильно влиять на выбор тока в силу совершенно незначительного различия, так как стоимость коллектора компенсируется более дорогим изготовлением статора трехфазного тока из листового железа.

Применение двигателей переменного тока может оказаться экономически выгодным, если они могут быть непосредственно включены в сеть высокого напряжения. Но изготовление высоковольтных двигателей ограничивается целым рядом соображений, о которых сказано несколько далее.

Необходимо, однако, возможно полнее оценить и недостаток, свойственный всякой установке переменного тока и характеризующийся так называемым „коэффициентом мощности“. Недостаток этот может стать весьма крупным при очень часто встречающихся в заводской практике условиях, а именно при большом числе мелких двигателей, работающих притом с переменной нагрузкой.

Вредное влияние $\cos \varphi$ может быть устранено целым рядом способов, и вопрос компенсации его приобретает такое значение, что мы посвятим ему специально следующую главу. Во всяком случае для определения выгодности трехфазного тока следует произвести подсчет удорожания установки, вызываемой дополнительными приспособлениями в виде фазокомпенсаторов и т. п., и только такое всестороннее сравнение двух или нескольких вариантов может дать правильное решение поставленной задачи.

6) Надо заметить, что при крупных, разбросанных территориально промышленных предприятиях условия передачи становятся настолько существенными, что при необходимости применения в производственных целях постоянного тока экономически наимыгоднейшей большей частью оказывается смешанная система тока.

Если крупные отделы целиком будут электрифицированы на постоянном токе, то этим будет избегнута нежелательная „пестрота“ электрического оборудования предприятия. При этом вся фидерная сеть и часть мощных нерегулируемых двигателей осуществляется на переменном токе высокого напряжения, а по отдельным цехам или корпусам устанавливается ряд подстанций: понизительных — переменного тока или преобразовательных — постоянного тока (для отделов и мастерских, требующих регулируемых моторов) в виде однокорных преобразователей, ртутных выпрямителей или мотор-генераторов с перевозбужденными синхронными двигателями, которые одновременно будут служить и для улучшения $\cos \varphi$.

Таким образом область применения постоянного и переменного тока можно считать принципиально выясненной.

Личное мнение автора по вопросу выбора рода тока, изложенное им еще в первом издании этого труда (1924/25 г.), находит себе подтверждение и в основных установках проектных организаций,

как Гипромез, Гипромаш и т. п., возникших за последние годы, а именно:

а) Регулируемые приводы — на постоянном токе, даже крупных мощностей (прокатные станы), если предел регулировки выше 2:1, так как каскадные агрегаты в этих случаях не выдерживают конкуренции.

б) Приводы с прерывистым режимом работы (роллганги, краны и т. п.) — на постоянном токе.

с) Приводы с продолжительным и кратковременным режимом работы без регулировки — на трехфазном токе, при этом преимущественно применяются: двигатели короткозамкнутые мощностью до 29 kW, с непосредственным пуском, а свыше — от пониженного напряжения, при отсутствии тяжелых пусковых условий, и двигатели с фазным ротором при тяжелых пусковых условиях или при требовании кратковременной небольшой регулировки вниз.

При крупных мощностях свыше 100 kW и отсутствии особо тяжелых пусковых условий — синхронные двигатели с магнитной целью, рассчитанной на перевозбуждение (опережающий $\cos \varphi$) и с пусковой короткозамкнутой демпферной обмоткой, способы пуска которых изложены выше, в § 10 главы VII, а механические свойства — далее, в § 6 главы X.

В заключение заметим, что различные требования, вытекающие из работы станков, часто противоречат друг другу в отношении выбора системы тока. Так, с одной стороны, широкая регулировка требует применения двигателей постоянного тока, тогда как невозможность хорошего надзора, загрязнение, влажность воздуха и другие причины говорят в пользу трехфазного тока. Поэтому проектирующему следует строго взвесить все обстоятельства за и против той или иной системы тока, сообразуясь со степенью важности различных требований.

§ 2. Выбор напряжения.

Выбор напряжения для а) внутривародской питательной сети и б) распределительной сети производится в первом случае с точки зрения: 1) территориального расположения предприятия, 2) стоимости сети и потерь в ней, 3) стоимости трансформаторов, 4) стоимости приборов управления, а во втором случае, кроме указанных, еще с точки зрения: 5) пределов выполнения типов электродвигателей в отношении напряжения и, 6) безопасности обслуживания.

Отсюда уже видно, что выбор наивыгоднейшего напряжения определяется, в сущности говоря, экономическим сравнением.

Надо заметить, что проведенная ныне во всех странах стандартизация напряжений настолько упрощает задачу выбора, что нередко даже пользование известными формулами для подбора наивыгоднейшего напряжения становится излишним в заводских сетях.

Действительно, если самый грубый предварительный подсчет показывает, например для переменного тока, что применение напряжения 220 V дает сечение проводов порядка сотен мм^2 , применение напряжения 3300 V — десятков мм^2 , а 6600 V — порядка единиц, которые все равно недопустимы для практических сечений, то зачастую все остальные сравнения становятся излишними.

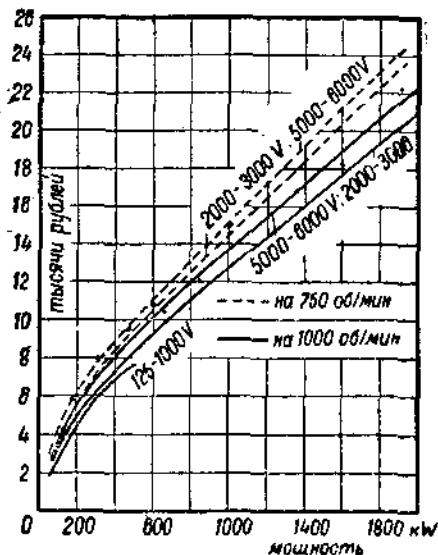
Самой собой понятно стремление при крупных и территориально разбросанных предприятиях применить для фидерной сети возможно высокое напряжение, так как затраты по устройству сети приблизительно пропорциональны квадрату напряжения.

Например, повышение напряжения в отношении 1:2 влечет за собой уменьшение расходов по устройству сети в отношении 4:1. Однако при малой мощности установки повышение напряжения может и не принести желательного удешевления, так как увеличение стоимости изоляции и приборов управления может не окупить незначительной в этом случае экономии на меди.

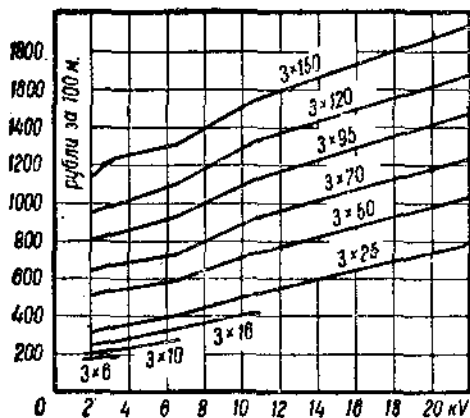
Несколько иначе ставится вопрос о выборе напряжения для распределительной сети, непосредственно питающей электродвигатели. Следует отметить, что выбор напряжения здесь уже связан с родом тока. Так, например, если иметь в виду постоянный ток, то экономическое сравнение всегда даст оптимум

в сторону повышенного напряжения, поскольку стоимость электродвигателей (в исполнении ВЭО) одинакова для диапазона напряжений 110—440 В, тогда как стоимость сети и аппаратуры вследствие меньших нагрузочных токов будет несколько меньше. При трехфазном токе и наличии мелкомоторных приводов, где стоимость электродвигателей для напряжений 125—500 В также одинакова, результат экономического сравнения направлен в ту же сторону. Этого нельзя сказать о высоковольтных двигателях (3000 и 6000 В), стоимость которых несколько повышается с увеличением напряжения (фиг. 491). Однако последнее обстоятельство может быть перекрыто выгодой на стоимости сети вследствие повышенного напряжения.

Изменение стоимости трехжильного кабеля видно на фиг. 492. Несомненно, что с целью уменьшения числа промежуточных трансформаторов и связанных с ними потерь всегда является заманчивым выбирать такое напряжение, чтобы осуществить непосред-



Фиг. 491.



Фиг. 492.

ственное включение двигателя в сеть. Надежность работы высоковольтных моторов доказывается многолетней практикой.

Однако, как известно, целый ряд обстоятельств ограничивает применение высокого напряжения, а именно:

Для постоянного тока:

- а) возможность короткого замыкания между щетками;
- б) пробивание изоляции между соседними коллекторными пластинами;
- в) пробивание изоляции якоря и индукторов особенно в сырых помещениях;
- г) трудность безискрового коммутирования;

д) уменьшение к. п. д. и увеличение стоимости, так как большое число тонких проводов с утолщенным слоем изоляции ухудшает коэффициент использования активного слоя якоря.

Для переменного тока:

- а) опасность пробивания изоляции между соединительными проводами и между головными частями катушек и железом;
- б) опасность разрушения изоляции от действия высокого напряжения;

в) понижение мощности и к. п. д. от толщины слоя изоляции.

Кроме всего этого величина мощности самих двигателей уже до некоторой степени определяет пределы для выбора напряжения.

Из табл. 154 видны значения минимальных мощностей, до которых указанные выше явления еще не заметны.

ТАБЛИЦА 154.

Напряжение в V	3 000	5 000	6 000
Наименьшая мощность в kW	30	80	132
Наименьшая мощность, при которой не наблюдается заметного уменьшения к. п. д. и мощности	100	200	400

В табл. 155 и 156 приведены предельные минимальные мощности электродвигателей для различных напряжений постоянного и переменного тока.

ТАБЛИЦА 155.

Предельные минимальные мощности электродвигателей для напряжений постоянного тока.

Мощность л. с.	Наивысшее допускаемое напряжение V.
Ниже $\frac{1}{4}$	100—200
" $\frac{1}{2}$	200—400
" 1	500
" 5	600
" 10	750

ТАБЛИЦА 156.

Предельные минимальные мощности электродвигателей для напряжений переменного тока.

Мощность л. с.	Наивысшее допускаемое напряжение V.
$\frac{1}{8}$	200—400
2	500—600
8	750—1000
25	1000—2000
50	1500—3000
100	2000—4000
250	5000—6000

Для применения в промышленных установках двигателей на 11 000 В достаточного обоснования, по крайней мере в практике СССР, пока не имеется, и такие двигатели на заводах ВЭО не строятся.

В САСШ на 11 000 В строятся синхронные двигатели мощностью свыше 500 л. с. и асинхронные — свыше 750 л. с.

По мнению американских специалистов двигатели напряжением 11 000 В дороже двигателей в 6000 В на 5%, зато канализация тока и аппаратура подстанций дешевле на 5—15% при 11 000 В.

При выборе напряжения следует принимать во внимание и безопасность обслуживающего персонала.

В сырых помещениях, где опасность для жизни от прикосновения к проводам больше, чем в сухих, желательно иметь низкое напряжение; точно так же при обслуживании привода мало обученным персоналом, например на нефтяных промыслах, и разного рода сезонных работах (сахарное производство), где состав рабочих переменный.

Надо заметить, что благодаря укоренившемуся среди монтеров мнению о безопасности напряжения в 500 В большое число несчастных случаев приходится именно на установки с этим напряжением. Поэтому при обсуждении вопроса о безопасности напряжения на Всесоюзном электротехническом съезде было много сторонников полного уничтожения этого напряжения. Однако с напряжением в 500 В приходится считаться, во-первых, в виду его фактического значительного распространения в заводских установках, а во-вторых и при проектировании установок с широко раскинутой распределительной сетью и с большим количеством малых двигателей, которые не могут быть непосредственно включены в сеть высокого напряжения (пряильные и ткацкие мастерские с одиночным приводом, механические мастерские с небольшими станками и т. д.).

При рациональном заземлении корпусов машин в установках на 500 В безопасность вполне обеспечена.

Таким образом при наличии мелкомоторного привода выгодным оказывается применение наивысшего напряжения из стандартного диапазона 500—110 В.

Для крупных электродвигателей вопрос этот не может быть предпрешен заранее, и здесь необходимо учесть весь комплекс оборудования установки (двигатель, сеть, аппаратура).

Вообще говоря, в промышленных предприятиях современного типа трудно добиться единства напряжения, и в этом нет особой практической целесообразности. Выбор напряжения, однако, не решается одними экономическими соображениями. Учитывая, что электродвигатель в настоящее время стал частью производственного механизма (одиночный привод), необходимо связать выбор напряжения также с вопросом об опасности поражения электрическим током производственного персонала цехов.

С этой точки зрения высоковольтные двигатели оказываются в сущности менее опасными, так как по своей мощности оправдывают применение дорогой аппаратуры с высококачественной изоляцией; кроме того такие двигатели обычно устанавливаются в особой

будке (кабине) и обслуживаются специально обученным персоналом.

Низший предел стандартного напряжения 110 В применяется весьма редко в современных промышленных предприятиях. Последнее объясняется не только стремлением избежать больших потерь в сети и громоздкой аппаратуры, но, что особенно актуально в настоящее время, — уменьшением расхода меди.

Таким образом практически выбор приходится производить для постоянного тока между напряжением в 220 и 440 В, а для переменного тока — 220, 380 и 500 В.

Что касается постоянного тока, то напряжение в 220 В является весьма распространенным в металлообрабатывающих предприятиях не только Советского союза, но также Европы и главным образом Америки.

Напряжение в 440 В применяется реже в виде двухпроводной, и чаще — трехпроводной системы.

Обращаясь к трехфазному току, отметим, что напряжение в 500 В привилось главным образом в текстильной промышленности и сохранилось в ней со времен господства группового привода (с этой оговоркой оно оставлено в стандарте IX ВЭС, см. выше).

Гораздо большее распространение имеют напряжения в 220 и 380 В.

Напряжение в 220 В имеет то преимущество, что при введенной нулевой точке (т. е. 4-проводной системе) могут быть применены общие силовые и осветительные трансформаторы. (Последнее допустимо в том случае, если толчки силовой нагрузки незначительно влияют на колебание напряжения в осветительной сети.) Питание силовой и осветительной нагрузки от общего трансформатора с выведенным нулем часто применяется в небольших предприятиях, давая экономию на числе трансформаторов и позволяя иметь между нулем и фазой наиболее выгодное для электрических ламп напряжение 120 В с точки зрения их световой отдачи. Следует также отметить, что при напряжении 220 В в сухих помещениях не требуется заземления.

Однако при большой мощности предприятия напряжение 220 В дает весьма громоздкую подстанцию и сеть вследствие больших токов и ограничения единичной мощности стандартных трансформаторов (по стандарту „ОСТ“ максимальная мощность трансформатора при 220 В равна 420 kVA).

Переходя к напряжению в 380 В, отметим, что здесь также возможно питание от общих трансформаторов силовой и осветительной нагрузки путем вывода нулевой точки трансформатора (4-проводная система).

Таким образом, двигатели включаются на напряжение 380 В и осветительные приемники на 220 В между фазным и нулевым проводами.

Так как напряжение 380 В согласно правилам и нормам IX ВЭС требует устройства защитного заземления, то необходимо иметь в виду, что осуществление такового создает иногда значительные затруднения.

Поэтому при выборе напряжения следует учитывать вопрос о выполнении защитного заземления и его стоимости.

§ 3. О способах построения графиков нагрузки.

Выбором рода тока и напряжения в сущности оканчивается область настоящего курса „Электроприводов“. Изложением методов построения графиков нагрузки обычно начинаются курсы „Электрических станций“. Так как, однако, между инженерами, работающими в указанных двух областях, существует различное понимание коэффициентов одинакового наименования, например коэффициентов загрузки, одновременности (совпадения) и т. д., то автор счел необходимым в свое время представить в Электропром ВЭО свой проект наименований для установления стандартных обозначений в области электрификации промпредприятий, которые в настоящее время утверждены ЦЭС (см. „Вестник электропромышленности“, № 1 за 1932 г., стр. 40, ст. инж. Петрова). Имея в виду, что график нагрузки необходим не только для определения мощности подстанции или станции и выбора величины агрегатов, но и для расчета фидеров, будет уместно все же указать общераспространенный способ его построения.

После установления номинальных мощностей, требуемых приемниками данной группы или групп цеха, и коэффициентов максимальной загрузки (понимая их как отношение номинальной мощности к выбранной ближайшей по стандарту мощности двигателя), сумму максимальных нагрузок приемников, относящихся к данному щитку, умножают на „коэффициент одновременности максимумов“. То же повторяется по отношению к группе щитков, питаемых от общего распределительного щитка мастерской; то же по группе мастерских, питаемых общим фидером; далее то же — по группе фидеров, питаемых от данного пункта или подстанции; наконец, то же — по группе питательных пунктов завода, питаемых заводской станцией или районной подстанцией. Это „многоэтажное“ пользование коэффициентами одновременности максимумов нагрузки, значения которых весьма ориентировочны, едва ли может быть оправдано.

Если бы по всем наиболее типичным отраслям промышленности было установлено отношение мгновенных, пятнадцатиминутных и полчасовых максимумов нагрузки по цехам к средней нагрузке, то было бы значительно проще, пользуясь коэффициентами средней загрузки ($\gamma_{B(mit)}$) типичных станков или группы станков данного цеха и коэффициентами одновременности работы станков (а не одновременности максимумов), получать непосредственно средние нагрузки на данном щитке или фидере.

Преследуя эту цель, автор в личных работах на промышленных предприятиях Ленинграда и в Бюро научно-технических исследований ЛОВЭО стремился получить такие значения этих коэффициентов, которые могли бы „в среднем“ характеризовать либо данный род станков, либо данный род производства. Задача — выполняемая только общими усилиями всех работников в области электропривода, но при одном обязательном условии единого понимания коэффициентов и единого метода их получения. Отсутствие этого условия и полная несравнимость публикуемых изредка исследований электроприводов заставили автора поставить в Центральном научном

совете электротехники ВЭО *) и на Областной конференции в Ленинграде, к сожалению не состоявшейся в 1931 г., доклад о методах исследования электроприводов и первых результатах работы на ленинградских предприятиях. Невысокая цифра отношения мгновенного и тридцатиминутного максимума к средней нагрузке, а именно: для металлопромышленности соответственно 1,3 и 1,1; для химической—1,2 и 1,1; для текстильной—1,1 и 1,0; для полиграфической—1,25 и 1,13 и т. д., заставляет критически отнестись к указанному выше способу „многоэтажного“ подсчета нагрузок по коэффициентам „одновременности максимумов“. Приведенные в докладе средние значения коэффициентов загрузки, коэффициентов одновременности работы приемников и коэффициентов использования мощности их могут быть рассматриваемы как самое первое приближение к тем значениям, которые могут быть получены только путем многолетних наблюдений и установления „динамики“ изменения „средних“ значений под влиянием реконструкции и прогресса техники электроприводов и электрификации технологических процессов.

*) Доклад в Центральном совете ВЭО от 18 июня 1931 г. напечатан в „Вестнике электропромышленности“, № 1 и 2, за 1932 г.

ГЛАВА X.

КОЭФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ И СПОСОБЫ ЕГО УЛУЧШЕНИЯ В ФАБРИЧНО-ЗАВОДСКИХ УСТАНОВКАХ.

§ 1. Причина возникновения сдвига фаз.

Количество энергии, накопленное в некотором элементе магнитного поля, пропорционально намагничивающей силе H и индукции B :

$$W = -\frac{1}{8\pi} \int B \cdot H \cdot dv. \quad (338)$$

Для воздушного промежутка сечением q и толщиной δ оно будет равно (при $H=B$)

$$W = -\frac{1}{8\pi} B^2 \cdot v = -\frac{1}{8\pi} B^2 q \delta,$$

т. е. больше в отношении $\frac{B}{H}$.

Если магнитное поле создается переменным током, то оно пульсирует с частотой тока, и его энергия то отдается в цепь, то берется из нее. Следовательно, чем больше частота тока, тем больше энергия, затрачиваемая на поддержание магнитного поля.

Мощность пульсирующего потока, называемая безваттной или реактивной:

$$P_{bl} = W \cdot 2\pi f = \frac{1}{4} B^2 \cdot f \cdot q \cdot \delta, \quad (339)$$

где f — частота переменного тока.

При переменной величине B необходимо ввести среднее значение для всего междужелезного промежутка:

$$\int B^2 dv.$$

Переменный ток, идущий на создание магнитного поля, так называемый безваттный ток I_{bl} , сдвинут по фазе на 90° относительно ваттного тока I_w . Геометрическая сумма их, т. е. полный ток, сдвинут относительно приложенного напряжения на угол φ , косинус которого называется коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = \frac{I_w}{I}.$$

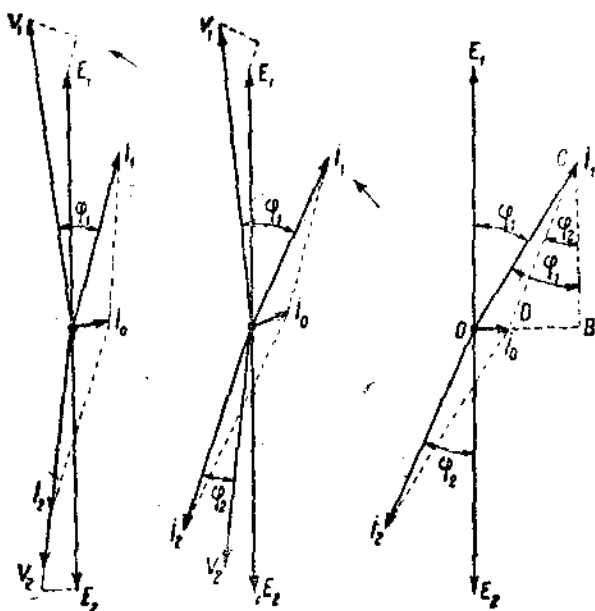
Из полной мощности переменного тока $P = V \cdot I$ полезно может быть использована только часть $P_w = V \cdot I_w = VI \cos \varphi$; безваттная же

мощность $P_{\text{н}} = V \cdot I \cdot \sin \varphi$, как сказано, только пульсирует в цепи.

Между тем сечение всех проводов установки (сети, двигателей) должно быть рассчитано на полный ток I , т. е. взято большим, чем то требуется полезной мощностью.

Разберем сначала причины сдвига фаз в фабрично-заводских установках и экономические последствия этого сдвига, а затем обратимся к мерам исправления его.

Из предыдущего уже ясно, что причиной сдвига фаз в сети переменного тока являются механизмы, требующие для своего



Фиг. 493.

действия магнитного поля, т. е. трансформаторы и в еще большей мере двигатели.

а) Трансформаторы. Если при безиндукционной нагрузке, т. е. при вторичном токе I_2 , совпадающем с напряжением V_2 , трансформатор сам по себе вызывает в первичной сети некоторый сдвиг фаз φ_1 (фиг. 493, слева), то при индукционной нагрузке, характеризуемой углом φ_2 во вторичной цепи, сдвиг на первичной стороне обусловится суммарным действием (фиг. 493, середина).

Пренебрегая падением напряжения в первичной и вторичной обмотках, получим из упрощенной диаграммы (фиг. 493, справа):

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\overline{OD} + \overline{DB}}{\overline{CB}}$$

где $OD = I_0$ — намагничивающий ток.

Так как

$$\overline{DB} = I_2 \sin \varphi_2 \text{ и } \overline{CB} = I_2 \cos \varphi_2,$$

то

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{I_0 + I_2 \sin \varphi_2}{I_2 \cos \varphi_2} = \frac{I_0}{I_2 \cos \varphi_2} + \operatorname{tg} \varphi_2$$

или

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_2} = \frac{I_0 + I_2 \sin \varphi_2}{I_2 \cos \varphi_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2} = \frac{I_0}{I_2 \sin \varphi_2} + 1. \quad (340)$$

Из этого отношения видно, что сдвиг фаз на первичной стороне будет тем больше, чем меньше нагрузка I_2 и чем больше ток холостого хода I_0 (намагничивающий ток).

Так как не существует такого механизма, в котором все магнитные линии потока были бы использованы, то утечка потока также влияет на величину безваттной мощности.

Поток рассеяния между первичной и вторичной обмотками зависит как от нагрузки, так и от рода обмотки и самой величины трансформатора. Так как поток рассеяния растет вместе с увеличением нагрузки, т. е. насыщения магнитопровода, то к. п. д. будет расти лишь до известных пределов нагрузки, и кривая к. п. д. должна иметь более или менее явно выраженный перегиб.

Относительное уменьшение намагничивающего тока с увеличением мощности (величины) трансформатора показано на фиг. 494.

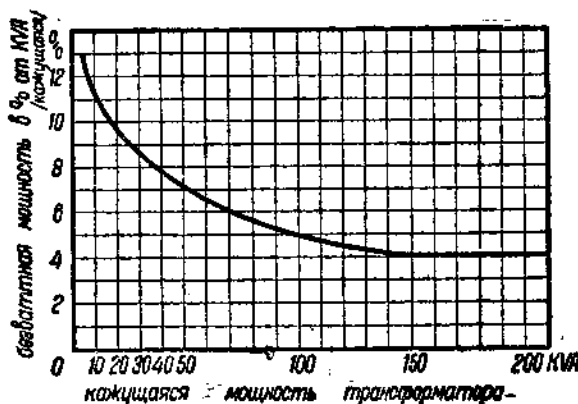
б) Асинхронные двигатели. Несравненно более сильное действие на понижение $\cos \varphi$ сети оказывают асинхронные двигатели.

Влияние междужелезного пространства и его величины δ уже было отмечено формулой (339): $P_{\text{ж.п.}} = \frac{1}{4} B^2 f q \delta$.

Не вдаваясь в электромеханику, здесь следует ограничиться общим указанием, что влияние как междужелезного пространства, так и формы обмоток, обуславливающей то или иное рассеяние, сводится к влиянию:

1) величины двигателя;

2) рода обмотки — см. фиг. 495, где видно, впрочем, не только влияние короткозамкнутой обмотки ротора и числа пар полюсов, но и величины двигателя. Особенно заметно влияние коротко-

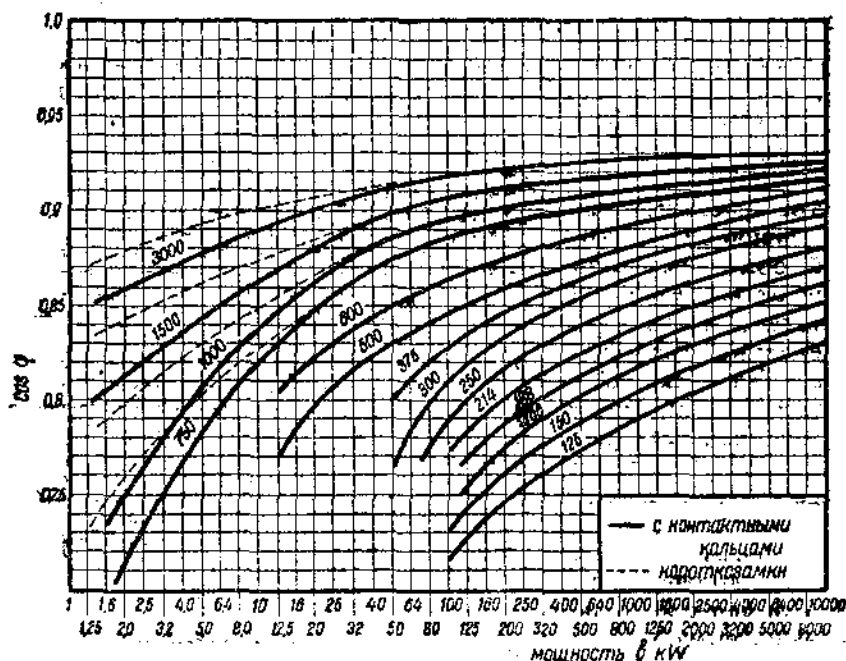


Фиг. 494.

замкнутой обмотки типа „беличьего колеса“ для малых двигателей (до 15 kW), где $\cos \varphi$ на 3—4% выше, чем у двигателя с фазным ротором такой же мощности и числа оборотов;

3) степени нагрузки, причем как в трансформаторах, и по тем же причинам кривая $\cos \varphi$ двигателей в функции нагрузки имеет перегиб, ясно видный на фиг. 496.

Так как двигатели одиночного (индивидуального) привода, главным образом мелкие, в массе выбираются со значительным запасом мощности, то влияние этой недогрузки весьма существенно. Несколько осуществимы мероприятия по более тщательному подбору мощности, будет сказано далее.

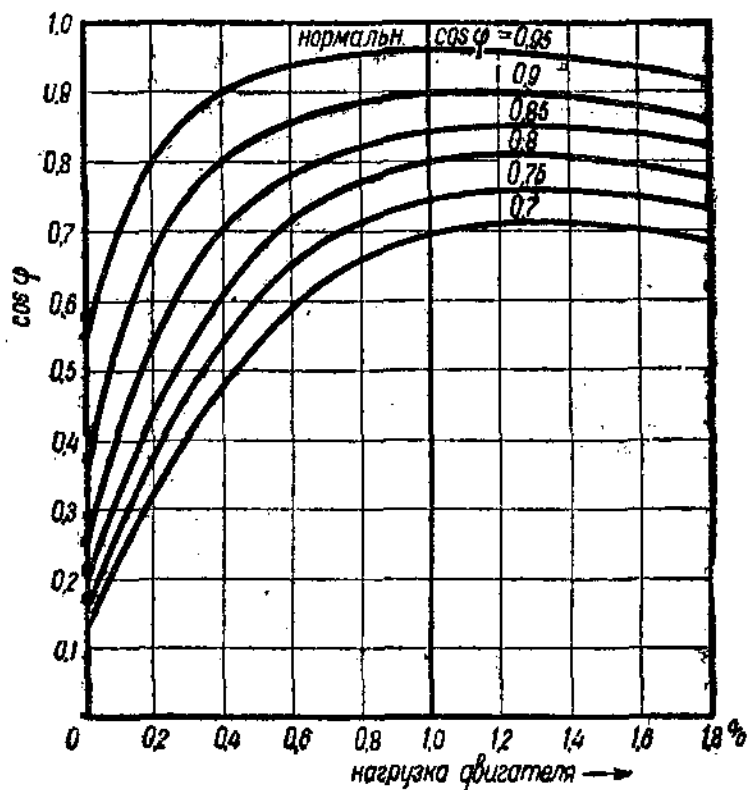


Фиг. 495.

Однако, помимо недогрузки двигателей, причина низкого $\cos \varphi$ иногда кроется в дефектах самих двигателей. Автору в его многочисленных исследованиях заводского электрического оборудования приходилось констатировать ненормально низкий $\cos \varphi$ и у полностью загруженных двигателей, причем причиной этого оказывался небрежный или неумелый ремонт двигателей. Можно указать на случай, когда при износе подшипников, вместо необходимого ремонта их, задевание статора о ротор было устранено обточкой последнего. Короткозамкнутый двигатель мощностью 1,1 kW, с нормальным междужелезным пространством в 0,35 мм и $\cos \varphi = 0,86$ после такого „ремонта“ получил величину междужелезного пространства в 0,5 мм, коэффициент мощности при полной нагрузке упал до 0,79, а сила тока при нормальной нагрузке увеличилась на 10%.

Иногда, при кустарной перемотке двигателей, вследствие недостаточно тщательной укладки проводников число их оказывается меньше того, которое было до ремонта, что обуславливает повышение индукции в железе и увеличение безваттной мощности, т. е. уменьшение $\cos \varphi$. Наряду с этим увеличиваются потери в железе, и понижается к. п. д.

В качестве примера можно указать на случай перемотки двигателя мощностью 2,2 kW, 380 V, 1500 об/мин. Вместо необходимых



Фиг. 496.

35 проводников в паз уложено только 32, после чего величина коэффициента мощности двигателя снизилась с 0,82 до 0,77.

с) Сварочные аппараты трансформаторного типа. Особенное влияние на $\cos \varphi$ оказывают получившие распространение за последние годы сварочные аппараты типа Wex в виде однофазных трансформаторов. К указанному уже влиянию намагничивающего тока присоединяется еще неравномерная нагрузка фаз. По обследованию автора $\cos \varphi$ в сварочных мастерских с такими трансформаторами падает до 0,2 — 0,3.

О влиянии самой сети, особенно воздушной, обладающей некоторой индуктивностью, говорить не приходится в виду его незначительности, поскольку линию передачи вне территории завода нельзя относить к заводской сети.

Из приведенных примеров уже понятно значение коэффициента мощности для правильной эксплуатации электрических установок переменного тока. Однако наблюдение за этой величиной часто затрудняется совершенно непонятной экономией в расходах на приобретение контрольных измерительных приборов, к сожалению наблюдаемой на большинстве наших предприятий. Эта экономия совершенно бессмысленна, ибо без контрольного ваттметра (переносного типа, а еще лучше регистрирующего) невозможна проверка загрузки двигателей или их состояния.

В случае отсутствия ваттметра определение коэффициента мощности двигателей или всей установки может быть легко произведено, с достаточной для практики точностью, по измерениям силы тока и напряжения при помощи амперметра и вольтметра, т. е. дешевых приборов, имеющих всегда под рукой.

Каждый двигатель обычно снабжается маркой с указанием нормального тока и $\cos \varphi$. В моторах старой конструкции данные о $\cos \varphi$ очень часто отсутствуют; в таком случае их можно получить из каталога или определить по кривым, аналогичным фиг. 495.

Кроме этих данных, необходимо определить силу тока холостой работы двигателя. Для более точного определения желательно было бы иметь значения $\cos \varphi$ холостого хода двигателя, но для приближенного способа можно принять его за нуль, т. е. сдвиг фаз между током и напряжением равным 90° . Произвести измерение тока холостого хода в условиях производства не всегда удастся из-за невозможности снять ремень или разделить соединительную муфту. В таких случаях вместо тока холостого хода можно измерить мало от него отличающийся намагничивающий ток при неподвижном двигателе и разомкнутом роторе. Измерение того или другого тока желательно производить при том напряжении, при котором определяется $\cos \varphi$ двигателя. В случае короткозамкнутого двигателя нужно произвести, конечно, только измерение тока холостой работы.

Пользуясь значением силы тока при полной нагрузке, обозначенной на щитке мотора, коэффициентом мощности при этой же нагрузке и силой тока холостого хода, можно построить две точки упрощенной круговой диаграммы Гейланда и определить таким образом значения $\cos \varphi$ при всех других нагрузках, отличных от нормальной.

Пример. Пусть данные щитка двигателя:

$$I = 65 \text{ A}; \quad \cos \varphi = 0,85.$$

Измерения холостого хода:

$$I_0 = 23 \text{ A при } V = 390 \text{ V}.$$

Требуется определить $\cos \varphi$ двигателя при его фактической нагрузке, которая определяется следующими данными:

$$I = 40 \text{ A}, \quad V = 370 \text{ V}.$$

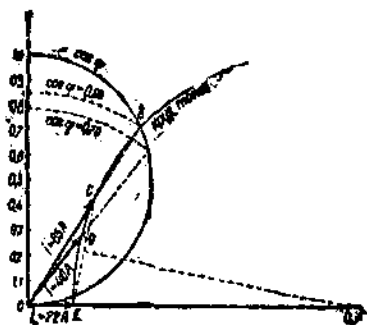
Сила тока холостого хода, приведенная к рабочему напряжению 370 V, будет равна

$$I_0 = 23 \frac{370}{390} = 22 \text{ A}.$$

Проводя в системе координат (фиг. 497) круг коэффициента мощности диаграммы Гейланда, переносим точку, соответствующую нормальному $\cos \varphi = 0,85$, на окружность и, получив точку B , намечаем линией OB — направление вектора тока I , на котором, в виде отрезка $\overline{OC} = 32,5 \text{ мм}$, *) откладываем в выбранном масштабе ($1/2 \text{ мм} = 1 \text{ А}$) нормальную силу тока, равную 65 А.

На оси абсцисс откладываем от точки O вектор тока холостого хода $I_0 = 22 \text{ А} = \overline{OE} = 11 \text{ мм}$. Проведя через точки C и E окружность, центр которой O_1 лежит на оси абсцисс, получим круг токов упрощенной диаграммы. Засекая окружность $\cos \varphi$ из точки O радиусом, равным силе тока $I = 40 \text{ А} = \overline{OG} = 20 \text{ мм}$, найдем соответствующий этой нагрузке коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,79$. Инж.

Шюлер предлагает для определения $\cos \varphi$ двигателя при частичной нагрузке еще более упрощенный метод, правда, за счет точности. Способ его основан на том, что отношение опрокидывающего момента двигателя к нормальному моменту вращения можно принять за величину, практически постоянную и равную 2,25. Сильного влияния на результаты определения $\cos \varphi$ такое допущение не окажет, так как разница на $\pm 20\%$ в диаметрах кругов тока, которые являются одновременно и мерой вращающего момента, дает отклонения в значениях $\cos \varphi$ на $\pm 2\%$ при полной нагрузке и $\pm 1\%$ при половинной. Построив такую универсальную диаграмму, инж. Шюлер строит ряд кривых зависимости $\cos \varphi$ от тока нагрузки, выраженного в процентах от нормального, для различных токов холостого хода (фиг. 498). Пользование кривыми удобнее иллюстрировать на примере, причем для сравнения обоих способов можно взять вышеразобранный случай.



Фиг. 497.

Ток холостого хода составляет от нормального:

$$\frac{22}{65} \cdot 100 = 34\%.$$

Значение $\cos \varphi$ нужно искать где-то между кривыми для 30 — 35% ближе к последней. Сила тока нагрузки, для которого ищется коэффициент мощности, составляет в процентах от нормальной:

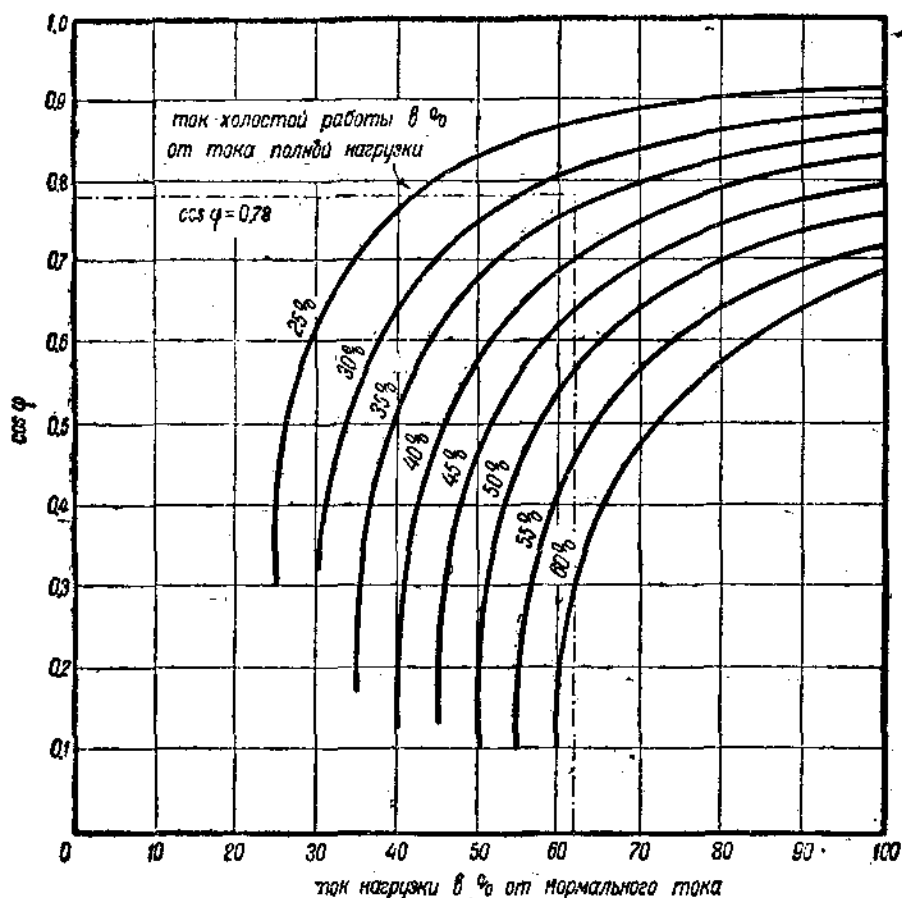
$$\frac{40}{65} \cdot 100 = 61,5\%.$$

Для этих данных получается из фиг. 498 значение $\cos \varphi = 0,78$. Разница между обоими способами получается в 1,3%, что, конечно, практического значения не имеет.

Таким образом можно легко и быстро определить $\cos \varphi$ для любой нагрузки, пользуясь показаниями амперметра. Знание $\cos \varphi$ дает возможность тотчас же определить и мощность на клеммах двигателя.

*) Масштаб изменен при снятии клише.

При сверке результатов, полученных по указанным упрощенным методам, с точными, полученными помощью ваттметра, амперметра и вольтметра, обнаружено отклонение на 1,5% для двигателей с контактными кольцами и на 2 — 3% для короткозамкнутых двигателей.



Фиг. 493.

§ 2. Влияние коэффициента мощности на использование проводов сети, генераторов и первичных двигателей станции и трансформаторов подстанции.

Выяснив причины возникновения сдвига фаз и влияние на него различных факторов, в частности режима работы двигателей и их типа, подойдем к этому явлению с другой стороны, т. е. вкратце разберем влияние сдвига фаз на использование сети, генераторов и первичных двигателей, как элементов фабрично-заводского силового хозяйства.

В предположении постоянной полезной мощности, т. е. постоянной величины ваттного тока, величина полного тока изменяется

пропорционально $\frac{1}{\cos \varphi}$, а тепловые потери, эквивалентные величине

$$I^2 R = (I_v^2 + I_{ii}^2) R,$$

будут расти пропорционально $\frac{1}{\cos^2 \varphi}$.

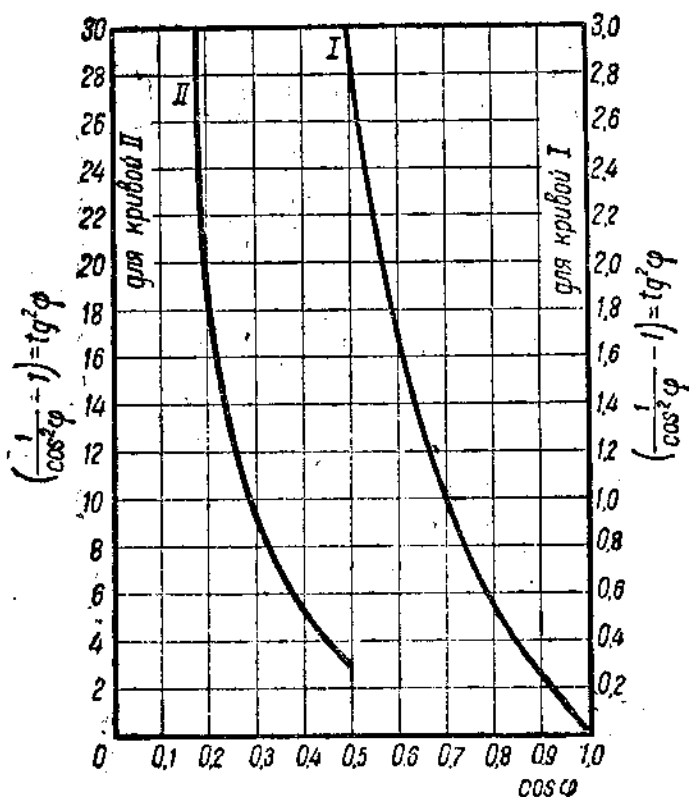
Увеличение силы тока в цепи в функции $\cos \varphi$ может быть определено выражением:

$$\frac{1}{\cos \varphi} - 1.$$

Тогда увеличение потерь должно выразиться через

$$\left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1 \right) = \frac{1 - \cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi} = \operatorname{tg}^2 \varphi, \quad (341)$$

т. е. тепловые потери пропорциональны квадрату тангенса угла сдвига фаз.



Фиг. 499.

На фиг. 499 показаны кривые увеличения потерь в зависимости от $\cos \varphi$. Например, при $\cos \varphi = 0,60$ потери возрастают в 1,8 раза против работы с $\cos \varphi = 1$.

ТАБЛИЦА 157.

$\cos \varphi$	Сила тока при полной нагрузке	Приращение силы тока
	(в процентах)	
1,0	100	0
0,9	111	11
0,8	125	25
0,7	143	43
0,6	167	67
0,5	200	100
0,4	250	125

ТАБЛИЦА 158.

$\cos \varphi$	Проценты джоулевых потерь	Увеличение потерь против нормаль- ных в %
1,0	100	0
0,9	123	23
0,8	156	56
0,7	204	104
0,6	279	179
0,5	400	300
0,4	625	525

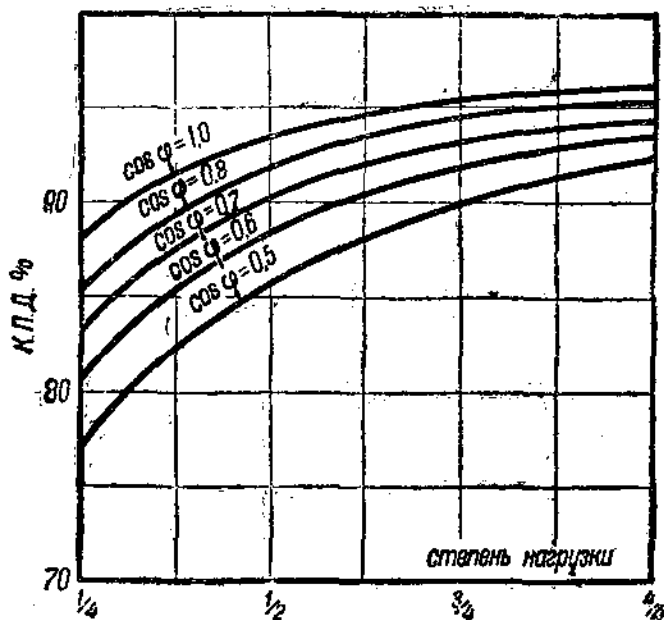
Вследствие повышенных потерь все токоведущие части должны быть взяты увеличенного сечения. Особенно сильно скажется это обстоятельство на сечении подводящих фидеров, выражаемом:

$$q = \frac{100 \cdot P \cdot l \cdot \rho}{p \cdot V^2 \cos^2 \varphi}, \quad (342)$$

где P — передаваемая мощность в ваттах, l — длина линии в метрах, ρ — удельное сопротивление $= \frac{1}{57}$, p — потери энергии в процентах и V — напряжение.



Фиг. 500.



Фиг. 501.

А так как стоимость сети составляет значительный процент от всего электрического заводского оборудования (около 15% для

крупных заводов), то работа с низким коэффициентом мощности может привести к очень ощутительным добавочным расходам по прокладке новых фидеров в установках, рассчитанных на более высокий $\cos \varphi$.

К этому надо добавить, что низкий $\cos \varphi$, вызывая увеличение падения напряжения в сети, влечет за собой неудовлетворительную работу асинхронных двигателей, вращающий момент которых пропорционален квадрату напряжения. Падение напряжения в силовых сетях нормально не должно превышать 5%, и, если по рассчитанному на это падение проводу будет передаваться та же мощность, но при $\cos \varphi$, меньшем расчетного, то падение напряжения может увеличиться до опасной для работы двигателей величины.

ТАБЛИЦА 159.

η при $\cos \varphi = 0,8$	η при $\cos \varphi = 0,9$	η при $\cos \varphi = 0,7$	η при $\cos \varphi = 0,8$	η при $\cos \varphi = 0,9$	η при $\cos \varphi = 0,7$	η при $\cos \varphi = 0,8$	η при $\cos \varphi = 0,9$	η при $\cos \varphi = 0,7$
95 94,5 94	95,5 95 94,5	94,5 94 93	83 82,5 82	84,5 84 83,5	81 80,5 80	71 70,5 70	73,5 73 72,5	68,5 67,5 67
93,5 93 92,5	94 93,5 93	92,5 92 91,5	81,5 81 80,5	83 82,5 82	79,5 79 78,5	69,5 69 68,5	72 72 71,5	66,5 66 65,5
92 91,5 91	92,5 92 92	91 90,5 90	80 79,5 79	82 81,5 81	78 77,5 77	68 67,5 67	71 70,5 70	65 64 63,5
90,5 90 89,5	91,5 91 90,5	89,5 89 88	78,5 78 77,5	80,5 80 79,5	76 75,5 75	66,5 66 65,5	69,5 69 68,5	63 62,5 62
89 88,5 88	90 89,5 89	87,5 87 86,5	77 76,5 76	79 78,5 78	74,5 74 73,5	65 64,5 64	68 67,5 67	61,5 61 60,5
87,5 87 86,5	88,5 88 87,5	86 85,5 85	75,5 75 74,5	77,5 77,5 76	73 72,5 72	63,5 63 62,5	67 66,5 66	60 59,5 59
86 85,5 85	87,5 87 86,5	84,5 84 83,5	74 73,5 73	76,5 76 75,5	71,5 71 70,5	62 61,5 61	65,5 65 64,5	58,5 58 57
84,5 84 83,5	86 85,5 85	82,5 82 81,5	72,5 72 71,5	74 74,5 74	70 69,5 69	60,5 60	64 64	56,5 56

Особое внимание следует уделять этому вопросу в том случае, когда предприятие снабжается энергией от районной станции или

от подстанции по длинным воздушным фидерам, которые, обладая самоиндукцией, могут вызвать значительное падение напряжения в линии. На фиг. 500 изображена диаграмма падения напряжения для двух случаев $\cos \varphi = 0,8$ и $\cos \varphi = 0,6$ при передаче одной и той же силы тока I . Как видно из диаграммы, при одинаковом начальном напряжении V_1 напряжение в конце линии будет тем меньше, чем больше сдвиг фаз.

ТАБЛИЦА 160.

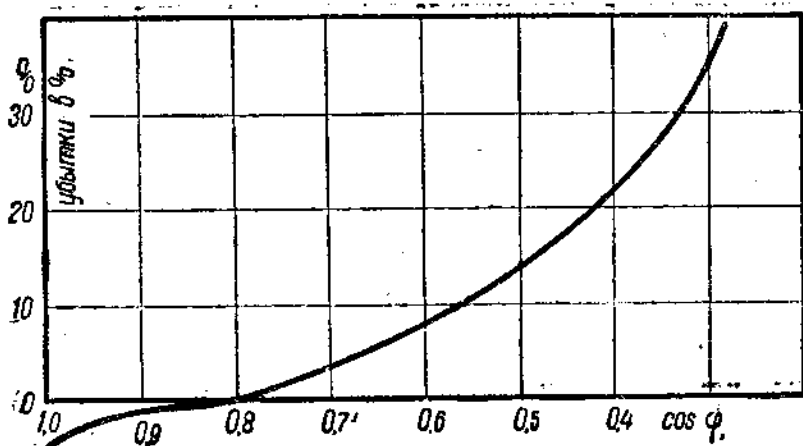
При $\frac{1}{4}$ на- грузки	При $\frac{3}{4}$ на- грузки	При $\frac{1}{4}$ на- грузки	При $\frac{3}{4}$ на- грузки	При $\frac{1}{4}$ на- грузки	При $\frac{3}{4}$ на- грузки	При $\frac{1}{4}$ на- грузки	При $\frac{3}{4}$ на- грузки
95 94,5 94	94 93,5 93	92 91 90,5	86 85 84	83,5 83 82,5	81 80,5 80	76,5 76 75,5	64 63 63
93,5 93 92,5	92,5 92 91,5	90 89 88,5	83 82 81	82 81,5 81	79,5 79 78,5	75 74 73,5	62 61 60
92 91,5 91	91 90 89,5	88 87 86,5	80 79 78	80,5 80 79	78 77 76	73 72 71	60 59 57
90,5 90 89,5	89 88,5 88	86 85 84,5	77 76 75	78 77 76	75 74 72,5	69,5 68 67	56 54 53
89 88,5 88	87,5 87 86,5	84 83 82,5	74 73 72	75 74 73	71,5 70,5 69	65,5 64 63	51 49 48
87,5 87 86,5	85,5 85 84,5	82 81 80,5	71 70 69	72 71 70	68 67 66	61,5 60 59	46 45 43
86 85,5 85	84 83,5 83	80 79 78,5	68 67 67	68 66 64	63,5 61 59	56,5 54 51,5	40 37 34
84,5 84	82,5 82	78 77,5	66 65	62 60	56,5 54	48,5 46	31 27

При $\cos \varphi = 0,6$ ($\varphi = 53^\circ$) напряжение в конце линии (вектор $\overline{OB}$) на 6% ниже напряжения при $\cos \varphi = 0,8$ (вектор $\overline{OA}$).

То же имеет место и в самых генераторах. Помимо перегрева, полный ток I увеличивает падение напряжения в их обмотках, и внешняя характеристика становится мягче.

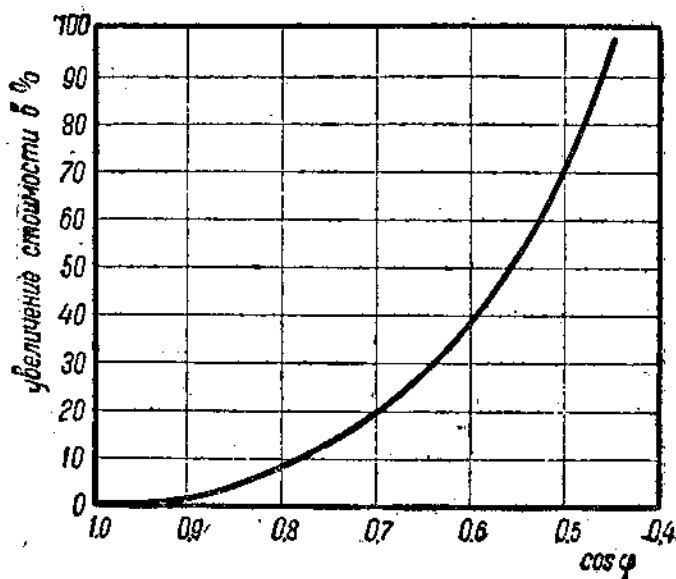
Усиление возбуждения, необходимое в этих случаях для поднятия напряжения, вызывает добавочное увеличение потерь.

На фиг. 501 даны кривые изменения к. п. д. генератора мощностью 2500 kVA фирмы Сименс-Шуккерт при различных коэф-



Фиг. 502.

фициентах мощности и нагрузках. Аналогичные же данные (в процентах), относящиеся к полной нагрузке генераторов и различным коэффициентам мощности, приведены в табл. 159 с точностью до 1%.



Фиг. 503.

Те же данные (в процентах) для частичной нагрузки приведены в табл. 160.

Таким образом пониженный $\cos \varphi$ может привести к тому, что к недоиспользованному по ваттному току генератору или транс-

форматору в виду перегрузки его полным током придется подключать резервный. А это будет иметь два последствия — недогрузку генераторов и трансформаторов (и, следовательно, увеличение эксплуатационных и потребительских расходов на электрическую энергию) и недогрузку первичных двигателей станции, т. е. увеличение расхода топлива и удельной стоимости энергии.

Для иллюстрации экономического влияния пониженного или повышенного $\cos \varphi$ можно привести приблизительную кривую, подсчитанную отделом электронадзора „Электроток“ в 1931 г. (фиг. 502), где за единицу для сравнения принят $\cos \varphi = 0,8$. На фиг. 503 приведена такая же кривая проф. Нитгаммера для германских условий.

ТАБЛИЦА 161.

Пределы колебаний $\cos \varphi$	Надбавка (в процентах)	Скидка
0,3 — 0,35	70,0	—
0,36 — 0,45	42,0	—
0,46 — 0,55	25,0	—
0,56 — 0,65	14,0	—
0,66 — 0,75	6,0	—
0,76 — 0,85	—	—
0,86 — 0,95	—	5,0
0,96 — 1,00	—	9,0

Естественно, что электрические станции стремятся повысить $\cos \varphi$ абонентов принудительно путем введения штрафного тарифа.

В табл. 161 приведен специальный тариф на безваттную энергию, введенный для промышленных предприятий города Ленинграда, и основанный на взимании штрафа за

$\cos \varphi$, меньший 0,80, и предоставлении льгот за $\cos \varphi$, превышающий 0,80.

Пример. Рассмотрим работу заводской блок-станции, рассчитанную по установленной мощности цеховых двигателей и вероятной их загрузке в предположении общего коэффициента мощности 0,80. Станция оборудована двумя генераторами мощностью по 500 kW при $\cos \varphi = 0,80$ и к. п. д. 0,92. Один из генераторов является резервным. В качестве первичного двигателя взята турбина мощностью 550 kW на давление пара 18 kg/cm² и 375°С. Нормальный удельный расход пара определен испытанием турбины в 10,5 kg/kWh.

При эксплуатации обнаружилось, что коэффициент мощности установки колеблется около 0,60, а необходимая ваттная мощность цехов составляет 450 kW. Кажущаяся мощность, которую должна дать станция, будет равна

$$P = \frac{450}{0,60} = 770 \text{ kVA.}$$

Генератор в состоянии развить только $\frac{500}{0,8} = 625 \text{ kVA}$. Таким образом для удовлетворения нагрузки цехов необходима добавочная мощность, так как один генератор оказался бы длительно перегруженным на

$$\frac{770 - 625}{625} \cdot 100 = 23\%,$$

что недопустимо.

Между тем полезная загрузка генератора составляет только

$$\frac{460}{500} \cdot 100 = 92\%.$$

Чтобы избежать установки добавочной мощности, можно прибегнуть к двум способам: 1) пустить запасной агрегат на параллельную работу с работающими или 2) улучшить коэффициент мощности до значения $\cos \varphi = 0,8$ с тем, чтобы генератор работал нормально.

Рассмотрим оба способа работы, хотя, конечно, первый не является правильным, так как в случае аварии одного из генераторов другой окажется перегруженным, и часть приключенных к сети двигателей придется остановить.

1) Оба генератора, работая параллельно, распределят нагрузку поровну каждый по 230 kW или 385 kVA.

Коэффициент загрузки каждого генератора

$$\eta_b = \frac{230}{500} = 0,46.$$

К. п. д. генератора при $\cos \varphi = 0,6$ и коэффициенте загрузки 0,46 определяется (из табл. 159 и 160 путем интерполяции) в 84,5%.

Следовательно, каждая турбина будет нести нагрузку в

$$\frac{230}{0,845} = 272 \text{ kW},$$

или 50% своей нормальной мощности.

По характеристике турбины (фиг. 504) расход пара при 50% нагрузке составляет: 12,5 kg/kWh, или всего в 1 час:

$$2 \cdot 12,5 \cdot 272 = 680 \text{ kg}$$

т. е. на 19% выше нормального.

2) В случае исправления коэффициента мощности до значения $\cos \varphi = 0,8$ кажущаяся мощность будет:

$$\frac{460}{0,8} = 575 \text{ kVA}.$$

Такую нагрузку свободно покроеет один генератор, работая с коэффициентом загрузки

$$\eta_b = \frac{460}{500} = 0,92.$$

Его к. п. д. будет около 92%, и нагрузка турбины составит

$$\frac{460}{0,92} = 500 \text{ kW},$$

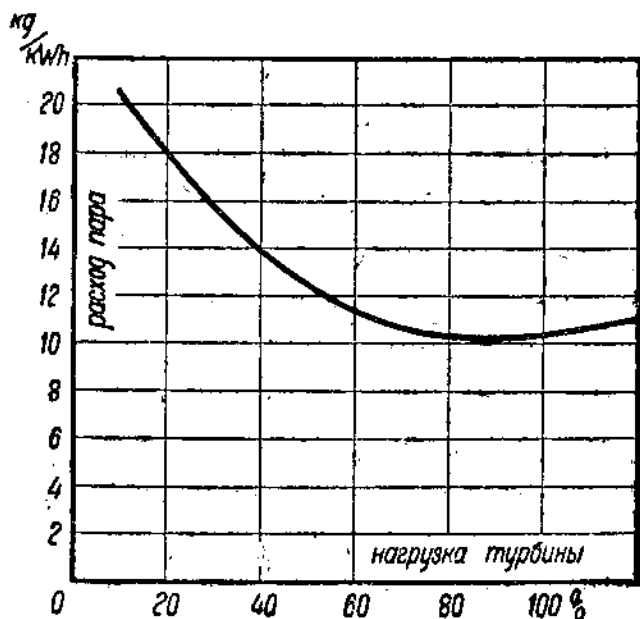
т. е. 91% нормальной мощности. Удельный расход пара при этом режиме равен 10,6 kg/kWh, или общий расход в 1 час:

$$10,6 \cdot 500 = 5300 \text{ kg},$$

т. е. всего на 0,95% выше нормального расхода.

Таким образом режим параллельной работы двух генераторов дает перерасход в

$$6800 - 5300 = 1500 \text{ kg пара в час.}$$



Фиг. 504.

Переводя эту цифру в килограммы условного топлива (7000 cal), получим часовой перерасход угля

$$\frac{1500 \cdot 765}{0,75 \cdot 7000} = 219 \text{ kg,}$$

где 765 — теплосодержание одного килограмма пара, 0,75 — к. п. д. котельной установки.

При стоимости угля теплотворной способностью 7000 калорий для условий г. Ленинграда — 25 руб. за тонну франко-завод — получим часовую экономию при исправленном $\cos \varphi$:

$$\frac{219 \cdot 25}{1000} = 5,47 \text{ руб.}$$

или в год при 4800 часах работы

$$4800 \cdot 5,47 = 26250 \text{ руб.}$$

В отношении расходов, связанных с компенсацией $\cos \varphi$, получаем следующее:

Допустим для простоты, что компенсация достигается установкой синхронного компенсатора, мощность которого для данного случая определялась в 260 kVA. Стоимость такового по данным ВЭО составляет 10 900 руб., что дает годовой расход по нормам ВСНХ в

$$0,15 \cdot 10900 = 1640 \text{ руб. в год.}$$

Расход энергии на вращение синхронного компенсатора составляет 7% от его полной мощности

$$260 \cdot 0,07 \cdot 4800 = 87500 \text{ kWh в год.}$$

Принимая различные стоимости 1 kWh энергии, получим различные ежегодные расходы, помещенные в табл. 162.

Цифры показывают безусловную выгоду увеличения $\cos \varphi$.

ТАБЛИЦА 162.

Стоимость 1 kWh в коп.	Стоимость энергии на вращение ком- пенсатора	Полные ежегод- ные расходы	Экономия компен- сации против параллельной ра- боты турбин
2,5	2 190	3 830	22 420
3,5	3 060	4 700	21 550
5,0	4 375	6 015	20 235
7,0	6 130	7 770	18 480
10,0	8 750	10 390	15 860

Трансформаторы заводских подстанций. В совершенно аналогичных с генераторами условиях находятся трансформаторы заводских подстанций. Низкий коэффициент мощности установок отражается весьма неблагоприятно на работе трансформаторов, вызывая в них по тем же причинам большое падение напряжения и ухудшение к. п. д.

Величину падения напряжения трансформатора при безиндукционной нагрузке можно всегда получить из каталога соответствующей фирмы, а по ней найти падение напряжения при индукционной нагрузке для любого коэффициента мощности, пользуясь некоторыми добавочными данными, обычно также помещаемыми в каталогах. Падение напряжения в процентах при известном $\cos \varphi$ определяется:

$$\Delta V_{\varphi} = \sqrt{(V_{\lambda}^2 - \Delta V^2) \cdot (1 - \cos^2 \varphi)} + \Delta V \cdot \cos \varphi, \quad (343)$$

где ΔV_{φ} — падение напряжения в процентах при угле φ сдвига фаз, V_{λ} — напряжение короткого замыкания в процентах, ΔV — падение напряжения при $\cos \varphi = 1$.

Значение к. п. д. трансформатора, пониженное вследствие увеличенного нагрева при низком $\cos \varphi$, можно легко найти по данным каталога как отношение:

$$\eta = \frac{\text{полезно отдаваемая мощность в kW}}{\text{полезно отдаваемая мощность} + \text{потери в железе} + \text{потери в меди}}.$$

Потери в железе определяются мощностью холостого хода P_0 трансформатора, характеризующей постоянные потери. Потери в меди определяются отношением

$$\frac{\Delta V \cdot P}{100}, \quad (344)$$

где ΔV — падение напряжения при $\cos \varphi$, равном 1. Тогда

$$\eta = \frac{P \cos \varphi}{P \cos \varphi + \frac{\Delta V \cdot P}{100} + P_0} \quad (345)$$

Влияние $\cos \varphi$ на работу трансформатора можно иллюстрировать на вышеуказанном примере установки, питаемой от подстанции с одним трансформатором мощностью 750 kVA, 6600/230 V.

Данные трансформатора по каталогу следующие:

К. п. д. при безиндукционной нагрузке	$\eta = 98\%$
Падение напряжения при безиндукц. нагрузке	$\Delta V = 1,55\%$
Напряжение короткого замыкания	$V_k = 3,25\%$
Мощность холостого хода	$P_0 = 2,97 \text{ kW}$

Установка работает, как было сказано, с нагрузкой 460 kW при $\cos \varphi = 0,6$. Следовательно, трансформатор использован всего на

$$\frac{460}{750} \cdot 100 = 61\%$$

своей полной мощности, тогда как по кажущейся мощности его коэффициент загрузки составляет:

$$\frac{460}{0,6 \cdot 750} = 1,02,$$

т. е. трансформатор работает с перегрузкой в 2%.

Падение напряжения трансформатора при $\cos \varphi = 0,6$ будет:

$$\Delta V_{\varphi} = \sqrt{(3,25^2 - 1,55^2) (1 - 0,6^2)} + 1,55 \cdot 0,6 = 3,22\%,$$

т. е. на 108% выше, чем при безиндукционной нагрузке.

Таким образом, при полной нагрузке напряжение на вторичных зажимах трансформатора будет 223,5 вместо первоначального 231. При падении напряжения в сети, равном 4%, цеховое напряжение будет 215 V; вследствие этого установленные в цехах двигатели будут работать с повышенной силой тока, что вызовет ненормальный нагрев.

Потери в меди трансформатора равны:

$$W = \frac{1,55 \cdot 750}{100} = 11,6 \text{ kW}.$$

К. п. д. при $\cos \varphi = 0,6$ будет:

$$\eta = \frac{750 \cdot 0,6 \cdot 100}{750 \cdot 0,6 + 11,6 + 2,97} = \frac{450 \cdot 100}{464,57} = 96,8\%$$

вместо нормального значения 98%.

Если бы в данном случае коэффициент мощности был искусственно увеличен, установленная мощность и стоимость трансформатора соответственно могли бы быть понижены.

§ 3. Меры борьбы с низким коэффициентом мощности и способы „местного“ его улучшения.

Для облегчения усвоения излагаемых далее крайне разнообразных способов исправления $\cos \varphi$ можно условно разделить их на способы „местного“ исправления путем повышения $\cos \varphi$ каждого отдельного потребителя безваттной энергии и общего „группового“ и „централизованного“ исправления для группы двигателей и централизованного для всей мастерской, цеха или завода. Необходимо, однако, оговориться, что в полной мере это разделение не удастся выдержать, так как „местное“ исправление $\cos \varphi$ можно выполнить с избытком, т. е. таким образом, что сдвиг фаз из отстающего превратится в опережающий, и двигатель, особенно в периоды недогрузки, будет исправлять общий $\cos \varphi$ в тем большей мере, чем крупнее его мощность и больше „опережение“. Следовательно, местное исправление может при известных условиях перейти в групповое и даже централизованное и притом в ощутительных для всей установки размерах. Таким образом в указанной трактовке условное разделение способов сделано все же недостаточно четко. Во избежание путаницы понятий в дальнейшем под „местным“ исправлением $\cos \varphi$ будем понимать дифференцированное, распределенное исправление $\cos \varphi$ только в пределах данного потребителя безваттной энергии, т. е., во-первых, применительно только к мелким потребителям и, во-вторых, с ограничением повышения $\cos \varphi$ до единицы, но не выше.

Влияние загрузки. Если отчетливое представление о влиянии недогрузки двигателей на их $\cos \varphi$ (фиг. 496) совершенно необходимо и существенно при проектировании электрического оборудования заново, когда проектирующий ничем не связан в выборе подходящей мощности двигателя, кроме шкалы стандартных мощностей, то задача чрезвычайно усложняется при переоборудовании. В отношении повышения $\cos \varphi$ повышением загрузки существующих двигателей можно идти двумя путями:

- 1) путем изменения загрузки станков, т. е. изменения режима технологического процесса;
- 2) путем замены двигателей более соответствующими существующей загрузке станков.

К сожалению, первый путь, несомненно более радикальный и улучшающий одновременно и использование станков, и использование двигателей, обычно отклоняется предприятиями вследствие сложности и длительности анализа технологического процесса всего предприятия или цеха в целом, а не только данного станка.

Наоборот, весьма охотно избирается второй путь.

Надо, однако, иметь в виду, что скоропалительная замена двигателей по нагрузке „сегодняшнего“ дня может оказаться только вредной, являясь в дальнейшем одним из препятствий рационализации использования станков. *)

*) См. проф. Ринкевич, Исследование электропривода как контроль технологического процесса на станках, „Вестник металлопромышленности“, 1932, № 2, стр. 39.

Итак, практически для электрика остается второй путь — путь замены двигателей. Однако и этот путь, представляя много трудностей, в редких случаях дает крупные результаты.

Действительно, помимо необходимости предварительного обследования существующей загрузки двигателей, вопрос правильного подбора их невольно будет сужен требованием использования существующего электрического оборудования и введен в рамки возможно полной перегруппировки. При ремённом приводе эта перегруппировка связана лишь с более или менее легко осуществимой заменой шкивов, но при жесткой связи она упрется в необходимость замены всей промежуточной передачи. Такие дополнительные расходы могут поглотить значительную часть, если не всю ту экономию, которую может дать исправление коэффициента мощности.

Так как, однако, устаревшее электрическое оборудование большинства заводов характерно широким применением ремённой передачи, то нижеприводимые примеры будут практически бесспорными.

Пример. Этот пример составлен на основании реальных цифр обследования одного из крупных старых ленинградских заводов. Данные об электрическом приводе приведены в табл. 163.

ТАБЛИЦА 163.

№ по пор.	Мощность двиг. в kW	Число об/мин	Фирма	Нормаль- ный $\cos \varphi$	Средн. мощ- ность на клеммах двиг. в kW	Измерен- ный $\cos \varphi$ средний	Мощность на валу в kW	Коэффициент загрузки (в процентах)	Привод
1	3,68	1420	С.-Гальске	0,83	2,27	0,7	1,7	46,0	Токарный ст.
2	2,20	1410	"	0,82	1,87	0,78	1,5	68,0	"
3	5,5	1440	"	0,84	2,1	0,61	1,6	34,5	Строгальный
4	23,6	965	С.-Шуккерт	0,87	6,8	0,55	4,72	20,0	Трансмиссия
5	1,85	1460	Динамо	0,80	1,90	0,79	1,5	81,0	Сверлильный
6	7,5	965	В.К.Э.	0,81	4,50	0,648	3,71	49,5	"
7	13,0	1440	"	0,87	6,2	0,705	5,1	39,0	Трансмиссия
8	13,2	720	Вольта	0,82	5,55	0,62	4,5	34,0	"
9	7,5	1450	С.-Гальске	0,85	5,05	0,79	4,05	55,0	"
Итого	88,03				36,22		28,38		

Наиболее плохо нагружены двигатели № 1, 3, 4, 6, 7, 8 и 9. На основании данных табл. 163 определяется среднее значение $\cos \varphi$ в сети мастерской. Безваттная составляющая нагрузки равна

$$P_{bl} = P_w \operatorname{tg} \varphi,$$

где P_w — ваттная составляющая, помещенная в табл. 164.

Результаты вычислений сведены в табл. 165.

По полученной сумме ваттных и безваттных составляющих найдем:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\Sigma P_{bl}}{\Sigma P_w} = \frac{41,05}{36,22} = 1,165$$

чему соответствует средний $\cos \varphi_1$ сети мастерской

$$\cos \varphi_1 = 0,65.$$

Как обусловлено выше, ограничим пример:

1) по возможности взаимной перестановкой двигателей и 2) приобретением минимального числа новых электродвигателей, необходимых лишь для начала передвижки существующих.

Заменяв двигатель № 4 мощностью в 23,6 kW двигателем № 3 — 5,5 kW и установив вместо последнего двигатель в 1,84 kW, взятый из заводского резерва, получим распределение, приведенное в табл. 165.

ТАБЛИЦА 164.

№	Ваттная составляющая P_w kW	$\operatorname{tg} \varphi$	Безваттная составляющая $P_{bl} = P_w \cdot \operatorname{tg} \varphi$ kVA
1	2,27	1,0	2,27
2	1,85	0,79	1,46
3	2,1	1,31	1,75
4	6,8	1,52	11,03
5	1,90	0,78	1,48
6	4,50	1,19	5,35
7	6,2	1,0	6,2
8	5,55	1,26	7,0
9	5,05	0,78	3,96
	36,22	—	41,05

ТАБЛИЦА 165.

№	Установлен. мощность двигателя kW	Мощность на клеммах двигателя kW	Мощность на валу двигателя kW	Коэффициент загрузки в процентах	$\cos \varphi$	Безваттная мощность kVA
1	3,68	2,27	1,7	46,0	0,70	2,27
2	2,2	1,85	1,5	68,0	0,78	1,46
3	1,84	2,0	1,6	87,0	0,83	1,34
4	5,5	5,61	4,72	86,0	0,82	3,88
5	1,85	1,90	1,5	81,0	0,79	1,47
6	7,5	4,50	3,71	49,5	0,648	5,34
7	13,0	6,2	5,1	39,0	0,705	6,2
8	13,2	5,55	4,5	34,0	0,62	7,05
9	7,5	5,05	4,05	55,0	0,79	3,75
	55,77	34,93	—	—	—	32,76

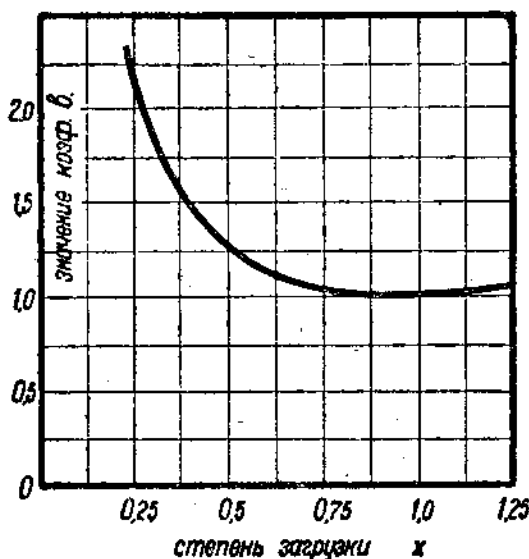
Отсюда

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{32,76}{34,93} = 0,935$$

или

$$\cos \varphi_2 = 0,73.$$

Как видно, большого повышения $\cos \varphi$ подобной перегруппировкой достигнуть не удастся. Само собой разумеется, что более существенные результаты получатся при проведении указанной меры в масштабе целого завода, когда возможность взаимной замены двигателей будет более широкой.



Фиг. 505.

Тем не менее подсчеты по перестановке двигателей без приобретения новых и с использованием лишь имевшегося на складе резерва, проделанные в отношении указанного завода в целом, дали повышение общезаводского $\cos \varphi$ с 0,59 до 0,68.

На том же примере мастерской этого завода с 9 двигателями можно показать, что может дать свободная замена двигателей более соответствующими по мощности, не стесняемая наличием и ограничиваемая лишь стандартом мощностей.

Пример. По каталогу ВЭО асинхронных двигателей типа *D* составлена новая таблица электрического оборудования мастерской (табл. 166). Значения $\cos \varphi$ при различных нагрузках взяты по кривым фиг. 496. Частичные значения k , p , d определялись по данным каталога ВЭО и по уже известной формуле Гольдшмидта (212)

$$\eta_x = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) b},$$

где $b = \frac{x + \frac{a}{x}}{1 + a}$; x — степень загрузки двигателя; a — отношение постоянных потерь к переменным, принятое для асинхронных двигателей нормального типа за единицу.

Значения b для различных степеней загрузки приведены на фиг. 505. По данным табл. 165 определены:

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{21,79}{33,57} = 0,65 \text{ или } \cos \varphi_3 = 0,83.$$

Значение — близкое к принимаемому за норму в проекте новых тарифов, т. е. не вызывающее ни штрафа, ни премии. Как уже сказано, такой результат легко достигим при рациональном проектировании электрического оборудования заново. Рентабельность такой замены в существую-

ших установках требует основательной проверки, с учетом типа передач и производственных условий.

ТАБЛИЦА 166.

№ по пор.	Мощность двигателя kW	Число об/мин n	Мощность на клеммах двиг. kW	Мощность на валу двиг. kW	Норм. cos φ по ВЭО	Коэффициент загрузки в процентах	Фактич. cos φ	Безваттная мощность kVA
1	1,75	1440	2,13	1,7	0,86	98,0	0,85	1,33
2	2,20*	1440	1,85	1,5	0,82	68,0	0,78	1,20
3	1,75	1440	2,0	1,6	0,86	91	0,83	1,32
4	5,50*	1440	5,61	4,72	0,84	86	0,82	3,87
5	1,85*	1460	1,76	1,5	0,80	81	0,79	1,36
6	4,50	940	4,43	3,71	0,83	82	0,82	3,08
7	6,80	1430	5,94	5,1	0,845	75,0	0,84	3,78
8	4,50	720	5,15	4,5	0,845	100,0	0,85	3,15
9	4,50	1430	4,70	4,05	0,865	90,0	0,845	2,7
	38,35	—	33,57	—	—	—	—	21,79

* Отмеченные звездочкой двигатели выбраны из числа существующих в работе

Действительно, по данным ВЭО стоимость вновь устанавливаемых двигателей составит:

ТАБЛИЦА 167.

Мощность	Количество	Двигатель (руб.)	Всего	Резистор (руб.)
1,75	2	140	280	Короткозамкнутый
4,5	1	364	364	49
6,8	1	364	364	49
4,5	1	435	435	49
7,5	1	270	270	Короткозамкнутый
Всего . .			1713	+ 147 руб.

или, если добавить 20% на монтаж и пригонку шкивов, — 2230 руб.

Косвенные расходы, согласно правилам ВСНХ принимаемые в 15% от затраченного капитала:

$$0,15 \cdot 2230 = 335 \text{ руб. в год.}$$

Принимая коэффициент одновременности работы станков η_r равным 0,70, получим:

Средняя суммарная потребляемая мощность всех двигателей после замены, т. е. при $\cos \varphi = 0,83$:

$$33,57 \cdot 0,7 = 23,6 \text{ kW.}$$

То же до замены, т. е. при $\cos \varphi = 0,65$:

$$36,22 \cdot 0,7 = 25,4 \text{ kW.}$$

Согласно проектируемым надбавкам на тариф „Электротока“, увеличение стоимости энергии при существующем $\cos \varphi = 0,65$ составляет 3,9% против $\cos \varphi = 0,8$.

Исходя из различного числа часов годовой работы и различной стоимости энергии при $\cos \varphi = 0,8$ и $\cos \varphi = 0,65$, получим приведенные в табл. 168 цифры, из которых видно, что с учетом косвенных расходов в 335 руб., замена 6 двигателей новыми при односменной работе (2400 час. в год) будет рентабельна при стоимости 1 kWh в 7,5 коп. (и выше) и при условии ременной передачи, требующей лишь замены шкивов для заменяемых двигателей.

ТАБЛ

Число часов работы в год		2 400			4 800		
$\cos \varphi$		0,65	0,83		0,65	0,83]	
Расход энергии kWh в год		61 000	56 500	Разность	122 000	113 000	Разность
Стоимость 1 kWh в руб.	2 к.	1 318	1 126	192	2 540	2 260	280
	3,5 к.	2 215	1 975	240	4 440	3 950	490
	5,0 „	3 160	2 820	340	6 340	5 640	700
	7,5 к.	4 740	4 230	510	9 500	8 450	1 050
	10,0 „	6 340	5 640	700	12 700	11 290	1 410

Примером хорошо использованных двигателей могут служить текстильные фабрики, где благодаря специфическим условиям производства коэффициент загрузки колеблется в пределах 0,8—0,9. Обследования этих фабрик показали, что их $\cos \varphi$ редко падает ниже 0,8.

В заключение следует заметить, что некоторых результатов по повышению $\cos \varphi$ завода можно добиться очень простой мерой — запрещением широко распространенного в практике обычая останавливать станок, но не останавливать электродвигатель при перерыве в работе станка (например ножниц). Это вредное влияние холостого хода, конечно, не может быть устранено никаким подбором двигателя по мощности.

Выбор типа. Вторым способом местного исправления $\cos \varphi$ является рациональный подбор типа. Влияние типа рассмотрим как со стороны чисто электрической (т. е. типа обмоток—короткозамкнутой или фазной), так и механической, т. е. типа по защите и быстроходности (см. главу V).

Эта мера, однако, идет вразрез с современной тенденцией стандартизации типов двигателей и применения минимума типов в данном предприятии (см. главу V), а также иногда понижает надежность в работе — факторы, играющие во многих предприятиях решающую роль.

Из этих соображений следует рекомендовать лишь массовое

применение определенных типов, например, короткозамкнутых двигателей, имеющих, как уже указывалось, значительно более высокий коэффициент мощности, чем двигатели с контактными кольцами, и гораздо меньшую стоимость (см. табл. 169 для двигателей, изготавливаемых ВЭО).

Этим обстоятельством объясняется отчасти тот колоссальный успех, который имеют короткозамкнутые двигатели в Америке, где мощность таких двигателей, приключаемых к сети общественного пользования, доходит до 400—500 kW. Однако в Европе еще много противников короткозамкнутых двигателей больших мощ-

А 168.

7 200			8 760		
0,65	0,83		0,65	0,83	
183 000	170 000	Разность	221 500	242 000	Разность
3 800	3 390	410	4 600	4 080	520
6 650	5 930	720	8 050	7 150	900
9 500	8 450	1 050	11 450	10 200	1 250
14 210	12 700	1 510	17 200	15 300	1 900
19 050	16 900	2 150	23 000	20 400	2 600

ностей в виду значительной силы тока при пуске, которая, не завися от нагрузки двигателя, колеблется в пределах от 4- до 8-кратной номинальной силы и вызывает значительные колебания напряжения, особенно заметные в низковольтных сетях.

Конечно, при современных крупных районных электростанциях взгляд на короткозамкнутые двигатели должен измениться. Так, например, короткозамкнутый асинхронный двигатель мощностью 5,5 kW, 220 V, с нормальным током в 20 A при включении на полное напряжение оказывает на сеть точно такое же действие, как двигатель с фазным ротором мощностью 23 kW, пускаемый при помощи реостата с пусковым током, равным 1,5 нормального, против которого ни одна станция протестовать не может. Даже при одновременном пуске нескольких короткозамкнутых двигателей средней мощности пусковые токи на крупных заводах не будут выше тех, которые имеют место в период пуска крупных двигателей с фазным ротором. На фиг. 506 приведены два графика, полученные с помощью регистрирующего прибора инж. Розенбергом (см. ETZ, 1927, № 19) на одной и той же фабрике. График верхний относится к работе предприятия на асинхронных двигателях с фазным ротором, график нижний—к работе после замены всех двигателей в пределах от 1 до 30 kW короткозамкнутыми.

Как видно, значительной разницы не наблюдается. В самый опасный момент—начало работы—график с короткозамкнутыми

двигателями дает очень незначительные пики. Приведенный пример относится к предприятию с небольшой потребляемой мощностью —

всего 300kW. Для крупных предприятий разница в пусковых периодах будет еще ничтожнее.

Нерациональность ограничения мощности и числа короткозамкнутых двигателей доказывается бесперебойной работой ряда блок-станций текстильных фабрик, оборудованных главным образом этими типами двигателей. Так, например, ленинградская текстильная фабрика „Советская звезда“ на всю установленную мощность в 3600 kVA имеет

короткозамкнутых двигателей на 2500 kW. Среди последних преобладают двигатели мощностью 4—5—9 kW, включаемые непосредственно на полное напряжение. По наблюдениям за работой этой установки, возникающие пики не превосходят 10% установленной мощности.

ТАБЛИЦА 169.

Т и п	Мощность kW	Число об/мин	Стоимость в рублях		Примечания
			С фазным ротором	Коротко- замкнутый	
A-31/1500	2,85	1 430	295	240	Все цены даны без шкива и салазков
A-32/1500	4,5	1 430	330	270	
T-1500/6,8	6,8	1 430	364	297	
T-1500/10	10,0	1 430	435	354	
T-1500/20,5	20,5	1 430	530	440	
T-1500/29	29	1 460	655	534	
A-32/1000	2,85	940	330	270	
T-1000/6,8	6,8	950	435	354	
T-1000/10	10	950	485	394	
T-1000/20,5	20,5	965	655	534	
T-1000/40	40	965	1 515	1 450	
T-1000/55	50	965	—	1 650	
D-1000/75	55,2	965	1 900	—	
D-1000/150	100	965	3 100	2 960	
T-750/10	10	715	530	460	
T-750/20,5	20,5	720	1 270	1 050	
T-750/55	50	720	2 150	1 950	
T-750/150	100	730	3 500	3 420	

Для того чтобы наметить предельные мощности короткозамкнутых двигателей, безопасно включаемых в сеть электрических станций, следует базироваться не на силе тока, а на максимально допускаемом падении напряжения в трансформаторе и сети предприятия. Ниже, в табл. 170, приведены данные о максимально возможной допускаемой мощности короткозамкнутых двигателей в зависимости от мощности питающего трансформатора и различных падений напряжения, взятые из работы инж. Дарманчева *) и несколько дополненные.

ТАБЛИЦА 170.

Трансформатор		Предельные мощности короткозамкнутых двигателей в kW при допускаемых падениях напряжения ΔV				
Нормальная мощность kVA	Напряжение короткого замыкания в процентах	$\Delta V=1\%$	$\Delta V=1,5\%$	$\Delta V=2\%$	$\Delta V=2,5\%$	$\Delta V=3\%$
50	4,1	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6
75	4,0	1,9	2,8	3,8	4,7	5,6
100	3,9	2,6	3,9	5,2	6,9	7,8
135	3,9	3,5	5,2	7,0	8,7	10,4
180	3,8	4,7	7,0	9,4	11,7	14,0
240	3,8	6,3	9,4	12,6	15,7	18,8
320	3,7	8,7	13,0	17,4	21,7	26,0
420	3,7	11,4	17,1	22,8	28,5	34,2
560	3,7	15,1	22,6	30,2	37,7	45,2
1 000	2,9	34,0	50,5	67,0	85,0	101,0
1 500	2,9	50,0	74,0	101,0	122,0	150,0
2 000	2,9	68,0	100,0	130,0	170,0	200,0

Как видно, мощность подключаемых двигателей с короткозамкнутым ротором может быть доведена до значительной величины даже без искусственного понижения пускового тока. Если же использовать и эту последнюю возможность, то мощность подключаемых двигателей может быть еще сильнее повышена.

Вопрос о способах ослабления пускового тока разбирался в главе III; поэтому остановимся только на одном из них, который можно использовать одновременно и для увеличения $\cos \varphi$ недогруженных двигателей. Способ этот — переключение обмоток статора при пуске со звезды на треугольник — позволяет при переменной работе понизить пусковой ток в 3 раза по сравнению с пуском на треугольнике (без переключения) и этим самым увеличить допускаемую сетью мощность короткозамкнутых двигателей в 3 раза против той, которая была указана в табл. 170. На основании наблюдений инж. Розенберга, при переключателях со звезды на треугольник допускаемая суммарная мощность короткозамкнутых двигателей может быть доведена до 80% мощности всей установки.

Увеличение $\cos \varphi$ недогруженного асинхронного двигателя ясно из приведенной на фиг. 507 упрощенной круговой диаграммы асинхронного двигателя (без учета потерь). Пусть при холостой работе

*) „Электричество“, 1929, № 9—10.

двигателя с обмоткой статора, включенной треугольником, каждая фаза потребляет ток, изображенный вектором $\overline{OA}$, при заторможенном роторе — ток $\overline{OB}$. Окружность, описанная на диаметре $\overline{AB}$, есть окружность токов. Допуская работу мотора с недогрузкой, которой соответствует ток, изображаемый вектором $\overline{OC}$, найдем для него ваттную составляющую, равную по величине $\overline{OD}$. Сдвиг фаз между током и напряжением определяется углом φ_A . Если теперь, не меняя нагрузки двигателя, переключить обмотку статора на звезду, то ток холостого хода должен снизиться в $\sqrt{3}$ раз до величины $\frac{OA}{\sqrt{3}}$,

изображенной на фиг. 507а вектором $\overline{OE}$. Точно так же изменится и ток короткого замыкания ($OF = \frac{OB}{\sqrt{3}}$). Проведенная через точки

E и F окружность будет геометрическим местом векторов фазных токов при включении обмотки статора звездой. Так как момент сопроти-

вления и вращения остается неизменным, то произведение $\overline{OD} \cdot \overline{OA}$, служащее, как известно из теории круговой диаграммы, мерой вращающего момента, должно оставаться неизменным и при включении звездой. Соответственно этому в новых условиях работы ваттная составляющая тока I_w удовлетворяет

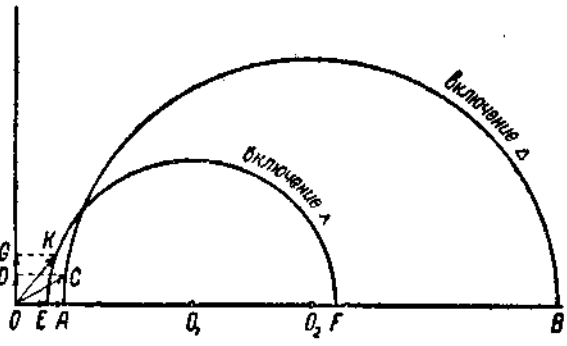
уравнению:

$$I_w \cdot \overline{OE} = \overline{OD} \cdot \overline{OA}$$

и изображена на диаграмме вектором $\overline{OG}$. Соответствующий этой составляющей полный ток равен вектору $\overline{OK}$. Угол сдвига между током и напряжением уменьшился до величины φ , но зато, как видно из диаграммы, увеличился фазный ток на 10% против работы треугольником. Увеличение фазного тока, однако, не вызывает повышения тока в линии, который благодаря переходу на звезду, будет все-таки ниже, чем при работе треугольником, правда, не точно в $\sqrt{3}$ раз, а несколько меньше.

В табл. 171 приведены данные для работы на треугольнике и звезде двигателя завода Броун-Бовери. В табл. 172 даны точно такие же данные для двигателя завода „Электросила“ мощностью в 2,2 kW при 1450 об/мин 220 V.

На фиг. 507b даны кривые коэффициентов мощности и полезного действия двигателя, на 6,6 kW, полученные инж. Розенбергом. Как видно, при недогрузке работа на звезде дает не только увеличе-



Фиг. 507 а.

ние $\cos \varphi$, но и значительное повышение к. п. д. вследствие уменьшения потерь в железе.

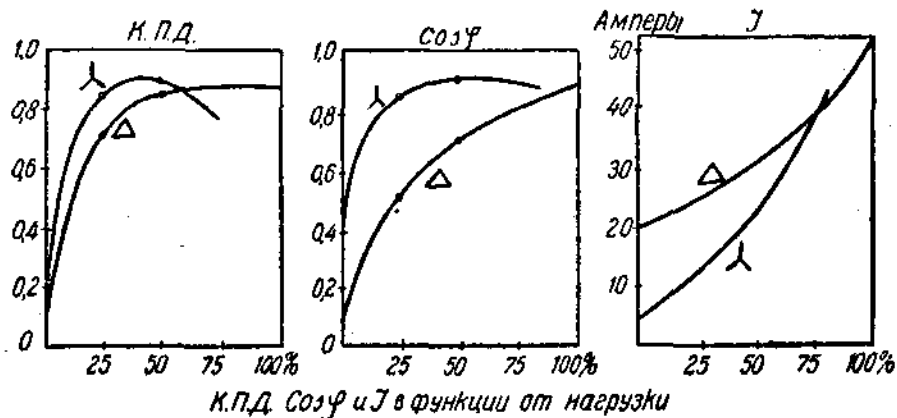
ТАБЛИЦА 171.

Нагрузка	Включение	$\cos \varphi$	Сила тока А	К. п. д. %
$\frac{1}{2}$ нормальной	{ $\triangle$ $\neg$	0,70	30	86
		0,91	23	88
$\frac{1}{4}$ нормальной	{ $\triangle$ $\neg$	0,51	24,5	72
		0,85	12,0	89

ТАБЛИЦА 172.

Нагрузка	Включение	$\cos \varphi$	Сила тока А	К. п. д. %
$\frac{1}{2}$ нормальной	{ $\triangle$ $\neg$	0,57	7,0	0,72
		0,66	6,0	0,735
$\frac{1}{4}$ нормальной	{ $\triangle$ $\neg$	0,40	5,9	0,61
		0,66	3,2	0,69

Размер годовой экономии, даже если ее подсчитать только по ваттной нагрузке (учитывая только к. п. д. и не учитывая штрафного тарифа), может вполне оправдать приобретение переключателей со звезды на треугольник (здесь речь идет о применении



Фиг. 507 б.

переключателя со звезды на треугольник в обратном смысле, т. е. при пуске и при полной нагрузке работа на треугольнике, а в периоды малой нагрузки — на звезде).

Однако взятые за границы патенты на автоматы, переключающие двигатель с треугольника на звезду при падении нагрузки до

определенного значения (и обратно), повидимому, не нашли практического применения. Причина может быть не только в сложности и, следовательно, неудобстве всяких автоматов, но и в паллиативности самого средства, идущего несколько вразрез с вышеуказанными более радикальными средствами тщательного подбора двигателей и повышения использования станков. Если разделить работу приводов на две группы — с кратковременными и с длительными периодами изменения нагрузки (недогрузки или перегрузки), то автомат нужен, конечно, преимущественно для первой группы, к которой относятся главным образом одиночные приводы. Но как раз за последнее время с этим явлением „случайной“ работы и, следовательно, „случайной“ нагрузки ведется борьба с двух сторон: а) со стороны организации производства — путем специализации станков на строго определенной работе и б) со стороны станкостроения — путем выпуска станков с широкой регулировкой и, следовательно, возможностью на всякой работе достичь высокого использования станка и двигателя. Такие станки, впрочем, большею частью электрифицируются постоянным током, получаемым от синхронных преобразователей, в свою очередь улучшающих $\cos \varphi$.

Ко второй группе (длительных периодов недогрузки) надо отнести работу: а) трансмиссионных приводов и б) станков с тяжелыми пусковыми условиями. Здесь автомат не нужен, а вполне достаточен ручной переключатель: а) длительная недогрузка трансмиссионного электродвигателя обычно наблюдается во вторую или третью смену. Рациональнее, конечно, перевести отдельные станки, отличающиеся по режиму работы от массы других той же трансмиссии, на одиночный привод. Однако впредь до переоборудования можно рекомендовать применять ручной переключатель с условием тщательного надзора за его положением при переходе от одной смены к другой; б) если тяжелые пусковые условия вызывают применение мощности двигателя, не используемой затем при нормальной работе, то опять-таки вполне достаточен ручной переключатель с треугольника при пуске на звезду при работе с недогрузкой. Несомненно, что для использования этого мероприятия по улучшению $\cos \varphi$ и к. п. д. привода необходимо массовое изготовление асинхронных двигателей с шестью выведенными концами обмоток, что и имеет место на заводах ВЭО.

В изложенном в начале этого параграфа понимании способов „местного“ исправления $\cos \varphi$ (только мелких двигателей и в пределах отставания тока, т. е. значения $\cos \varphi$ не выше единицы) к ним надо отнести еще: 1) применение компенсированных двигателей и 2) индивидуальное применение статических конденсаторов к мелким двигателям (доведенное в САСШ до двигателей мощностью порядка $\frac{1}{10}$ л. с., например двигателей зубообрабатывающих машин). Однако об этих способах будет сказано далее, тем более что за последние годы компенсированные двигатели если и строятся, то преимущественно крупных мощностей (фирмой Заксенверк), а статические конденсаторы применяются главным образом в виде батарей как средство „централизованной“ компенсации в небольших предприятиях.

§ 4. Способы централизованной и групповой компенсации.

Описанные способы местного улучшения коэффициента мощности чрезвычайно просты, но позволяют регулировать его в очень небольших пределах и не освобождают совершенно от безваттного тока генераторы и линию.

Достичь высокого $\cos \varphi$ можно двумя путями: 1) дополнительной установкой специальных машин-генераторов безваттной мощности, потребляемой существующими асинхронными двигателями; 2) применением для электроприводов мощных двигателей высокого или даже опережающего $\cos \varphi$, который в свою очередь влияет на общий $\cos \varphi$, приближая его к единице.

В дальнейшем будем придерживаться такого деления.

Если на конце линии имеется индуктивная нагрузка, создаваемая двигателями, работающими при напряжении V_2 , то в цепи будет существовать некоторый сдвиг фаз, характеризуемый углом φ_2 .

Соответствующий этому сдвигу безваттный ток выразится:

$$I_{bl} = I_1 \sin \varphi_2.$$

Допустим теперь, что величина $I_1 \sin \varphi_2$ должна быть уничтожена путем включения емкости параллельно индуктивной нагрузке. Для этого необходимо подобрать величину емкости так, чтобы зарядный ток

$$I_c = V_2 \omega C$$

был равен по величине безваттной составляющей $I_1 \sin \varphi_2$, а по направлению противоположен ей (фиг. 508а), т. е.

$$V_2 \omega C = I_1 \sin \varphi_2. \quad (346)$$

Обозначая через P мощность установки в kVA, получим величину силы тока:

$$I_c = \frac{P \cdot 1000}{V_2}.$$

Подставляя это значение в уравнение (346), найдем емкость C в фарадах

$$C = \frac{1000 P \cdot \sin \varphi_2}{\omega \cdot V_2^2},$$

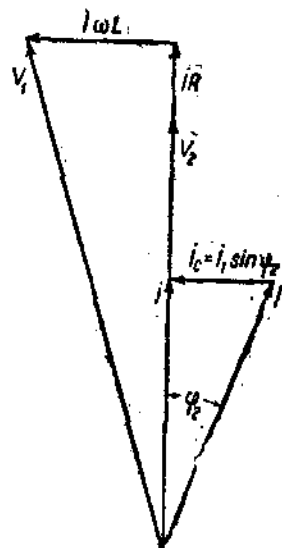
или в микрофарадах

$$C = \frac{P \cdot \sin \varphi_2}{\omega \cdot V_2^2} \cdot 10^9,$$

иначе

$$C = \frac{P_{bl} \cdot 10^9}{\omega \cdot V_2^2}. \quad (347)$$

Если необходимо выполнить компенсацию так, чтобы совпадали по фазе ток I_1 и напряжение в начале линии V_1 , то, согласно



Фиг. 508 а.

фиг. 508b, емкостный ток I_c должен быть равен и противоположен по направлению сумме

$$\overline{AB} + \overline{BD},$$

где $\overline{AB} = I_1 \sin \varphi_2$, $\overline{BD} = \overline{OB} \cdot \operatorname{tg} \psi$, или, так как $\overline{OB} = I_1 \cos \varphi_2$, $\overline{BD} = I_1 \cos \varphi_2 \cdot \operatorname{tg} \psi$.

Следовательно, емкостный ток I_c должен уравновешивать обе слагающие $\overline{AB}$ и $\overline{BD}$:

$$I_c = V_2 \omega C = I_1 \sin \varphi_2 + I_1 \cos \varphi_2 \cdot \operatorname{tg} \psi,$$

откуда:

$$C = \frac{I_1 \sin \varphi_2 + I_1 \cos \varphi_2 \cdot \operatorname{tg} \psi}{V_2 \omega}. \quad (347')$$

Подставляя ранее выведенное значение

$$I_1 = \frac{P \cdot 1000}{V_2},$$

получаем:

$$C = \frac{\frac{1000P}{V_2} \sin \varphi_2 + \frac{1000P}{V_2} \cos \varphi_2 \operatorname{tg} \psi}{V_2 \omega}$$

или

$$C = \frac{1000P (\sin \varphi_2 + \cos \varphi_2 \cdot \operatorname{tg} \psi)}{V_2^2 \cdot \omega}.$$

Умножая числитель и знаменатель последнего уравнения на величину $\cos \psi$, получим:

$$C = \frac{1000P (\sin \varphi_2 \cdot \cos \psi + \cos \varphi_2 \cdot \sin \psi)}{V_2^2 \cdot \omega \cos \psi} = \frac{1000P \cdot \sin (\varphi_2 + \psi)}{V_2^2 \omega \cos \psi}$$

или в микрофарадах:

$$C = \frac{P}{V_2^2 \omega} \cdot \frac{\sin (\varphi_2 + \psi)}{\cos \psi} \cdot 10^9. \quad (348)$$

Обратимся к описанию аппаратов и машин, дающих необходимую, рассчитанную по формуле (348), емкость.

§ 5. Статические конденсаторы.

Как уже сказано, конденсатор должен быть подключен параллельно индуктивной нагрузке.

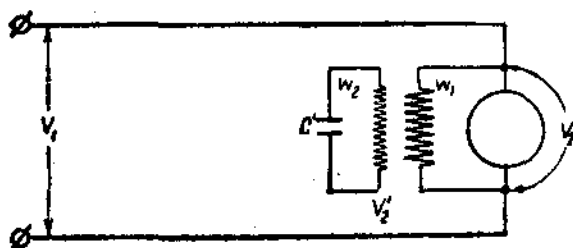
Однако при непосредственном параллельном включении конденсатора его емкость должна быть очень значительной.

Для уменьшения ее конденсатор подключают через повысительный трансформатор фиг. 509.

Рассмотрим этот случай.

Необходимый зарядный ток будет:

$$I_c = V_2 \omega C.$$



Фиг. 509.

Если перенести весь процесс на сторону высокого напряжения V_2' , связанного с напряжением V_2 зависимостью

$$V_2' = V_2 \cdot \frac{w_2}{w_1} = \frac{V_2}{\mu},$$

где w_1 и w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора, а $\mu = \frac{w_1}{w_2}$ — коэффициент трансформации, то зарядный ток выразится:

$$I_c' = V_2' \omega C';$$

заменяя $I_c' = I_c \frac{w_1}{w_2}$ и $V_c' = V_2 \frac{w_2}{w_1}$, получим:

$$I_c \frac{w_1}{w_2} = V_2 \omega C' \frac{w_2}{w_1};$$

так как согласно вышесказанному

$$I_c = I_1 \sin \varphi_2,$$

то

$$C' = \frac{I_1 \sin \varphi_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2}{V_2 \cdot \omega} = \frac{I_1 \sin \varphi_2 \cdot \mu^2}{V_2 \omega}.$$

Выразив в последнем уравнении I_1 через $1000 \frac{P}{V_2}$, получим:

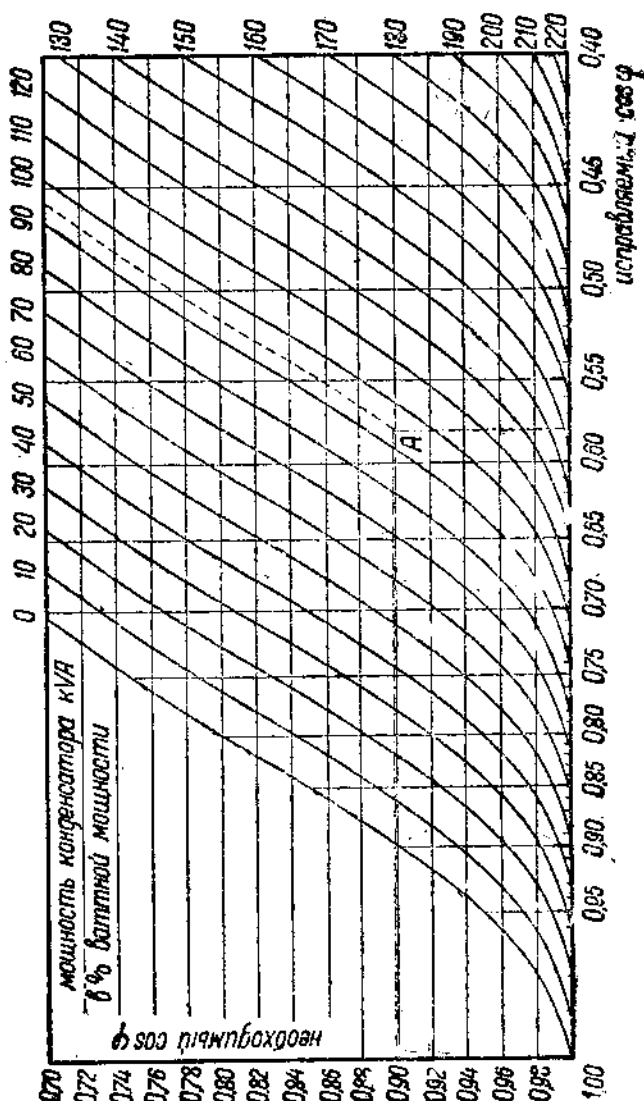
$$C' = \frac{1000 P \cdot \sin \varphi_2}{V_2^2 \cdot \omega} \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2$$

или в микрофарадах:

$$C' = \frac{P \cdot \sin \varphi_2}{V_2^2 \cdot \omega} \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot 10^9 \frac{P \sin \varphi_2}{V_2^2 \omega} \cdot \mu^2 \cdot 10^9. \quad (349)$$

Сравнивая формулы (348) и (349), видим, что емкость конденсатора уменьшается пропорционально квадрату коэффициента

трансформации $u = \frac{w_1}{w_2}$. В практических расчетах обычно конденсаторы маркируются не по их емкости, а по той безваттной мощности, компенсировать которую они предназначены.



Фиг. 510.

Для упрощения подсчета необходимого конденсатора приводится диаграмма фиг. 510, позволяющая графическим путем быстро определить необходимую мощность конденсаторной батареи в зависимости от мощности P компенсируемой установки. Диаграмма построена на выведенной ниже формуле (350):

$$P_k = P_w (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi'),$$

в которой P_k — необходимая для компенсации безваттная мощность, выраженная в kVA, P_w — ваттная мощность двигателя или установки, φ и φ' — углы сдвига фаз до и после исправления.

Полученные таким образом значения P_k нанесены на графике фиг. 510 в виде кривых в процентах ваттной мощности. По оси абсцисс отложены значения $\cos \varphi$ до улучшения, по оси ординат — желаемые $\cos \varphi'$. Точка пересечения координат $\cos \varphi$ и $\cos \varphi'$ попадает на кривую, обозначающую необходимую безваттную мощность конденсатора в kVA на каждые 100 kW мощности исправляемой установки.

Пример. Установка из трехфазных двигателей, потребляя 290 kW при $\cos \varphi = 0,58$, должна работать при $\cos \varphi' = 0,90$. Необходимая мощность конденсатора определится следующим построением. Из точек 0,58 на оси абсцисс (фиг. 510) и 0,90 на оси ординат проводим вертикаль и горизонталь до точки пересечения А. Путем интерполяции находим кривую безваттной мощности, проходящей через эту точку, соответствующую 94% от ваттной мощности.

Таким образом необходимо поставить конденсатор мощностью

$$P_k = 290 \cdot 94 \cdot 10^{-2} = 272 \text{ kVA}.$$

В практике для повышения коэффициента мощности пользуются батареями статических конденсаторов, собранных из отдельных элементов емкости.

Простота конструкции конденсаторов, минимальный уход за ними во время работы и чрезвычайно высокий к. п. д., достигающий 99% и более, служат причиной распространения их в зарубежной практике. Мощность отдельных батарей статических конденсаторов доходит в настоящее время до 600 kVA, причем более крупные мощности, примерно от 50 kVA, изготавливаются как на низкое, так и на высокое напряжение. Конденсаторы изготавливаются из твердого диэлектрика — пропитанной бумаги — для напряжений до 5000 V и из слюды или стекла для более высоких напряжений с обкладками из свинцовой или алюминиевой фольги.

Однако наряду с огромными удобствами статические конденсаторы обладают рядом недостатков, тормозящих их развитие. Во-первых, стоимость статических конденсаторов при больших мощностях выше, чем других машин безваттной мощности. В табл. 173 приведены данные конденсаторов германской фирмы AEG, а в табл. 174 — швейцарской фирмы Микафил. Цены даны в рублях с учетом пошлины и прочих накладных расходов на импортное оборудование, согласно временной инструкции Главэлектро.

В табл. 175а, 175б и 175с и на фиг. 511 приведены соответствующие размеры конденсаторов фирмы AEG.

Второй недостаток статических конденсаторов резко выявляется при включении их в сеть с несинусоидальной кривой напряжения (наличием высших гармоник). Так как проводимость конденсатора увеличивается с повышением частоты, то сопротивление его будет очень ничтожно для третьей, пятой и т. д. гармоник, и через конденсатор пойдут токи, равные

$$I_1 = 2\pi f \cdot V_1 \cdot C \cdot 10^{-8} \text{ A},$$

$$I_3 = 2\pi f \cdot 3 \cdot V_3 \cdot C \cdot 10^{-8} \text{ A},$$

$$I_5 = 2\pi f \cdot 5 \cdot V_5 \cdot C \cdot 10^{-8} \text{ A},$$

ТАБЛИЦА 173.

Т и п	Напряжение V	Мощность kVA	Вес kg	Цена конденсатора	Цена 1 kVA
				Руб.	Руб.
D-220/50 D-220/75 D-220/150	220	5 7,5 15	81	400	80
D-380/30 D-380/75 D-380/150 D-380/560 D-380/760 D-380/940 D-380/1080 D-380/1450 D-380/1800 D-380/2180 D-380/2900	380	5 7,5 15 56 76 94 108 145 180 218 290	81 800 980 1140 1260 1580 1880 2190 2880	310 3130 3950 4790 5400 7020 8550 10250 13500	62 56 52 51 50 48,5 47,5 47 46,5
D-500/50 D-500/75 D-500/150 D-500/650 D-500/870 D-500/1090 D-500/1260 D-500/1680 D-500/2100 D-500/2500 D-500/3350	500	5 7,5 15 65 87 109 126 168 210 250 335	81 790 960 1110 1240 1540 1840 2140 2760	310 2985 3780 4570 5200 6680 8330 9750 12700	62 46 43,5 41,6 41,3 40 39,6 39 38
D-2000/870 D-2000/1680 D-2000/3350	2000	87 168 335	960 1540 2760	3780 6680 12700	43,4 40 38
D-3000/920 D-3000/1760 D-3000/3500	3000	92 176 350	925 1470 2620	3460 6075 12700	37,5 34,5 36,5

ТАБЛИЦА 174.

Т и п	Размер	Напря- жение V	Емкость μF	Мощ- ность kVA	Вес kg	Цена конден- сатора	Цена 1 kVA
						Руб.	Руб.
D-1/250	251 × 118 × 410	220	26	0,39	11,5	61	157
D-3/250	251 × 354 × 410		52	0,775	34,0	107	138
D-5/250	251 × 354 × 410		103	1,55	39,0	194	125
D-1/380	251 × 118 × 410	380	26,1	1,13	11,5	107	94,5
D-2/380	251 × 118 × 410		34,5	1,56	12,5	120	77
D-3/380	251 × 354 × 410		52,2	2,37	34	187	79
D-4/380	251 × 354 × 410		69	3,12	35	215	69
D-5/380	251 × 354 × 410		103	4,66	39	285	61
D-1/500	251 × 118 × 410	500	26,1	2,06	11,5	133	64,5
D-2/500	251 × 118 × 410		34,5	2,70	12,5	157	58
D-3/500	251 × 354 × 410		52,2	4,10	34	236	57,5
D-4/500	251 × 354 × 410		69	5,45	35	298	53
D-5/500	251 × 354 × 410		103	8,10	39	415	51,2

ТАБЛИЦА 175а.

Напряжение 380 V при 50 пер/сек.

Т и п	Мощность kVA	Сила тока A	Размеры mm (см. фиг. 511)						Вес kg
			a	b	c	d	e	f	
D-380/500	5		450	210	662				81
D-380/560	56	85	680	890	1320	890	1095	570	800
D-380/760	76	116	850	800	1320	1060	1095	570	980
D-380/940	94	143	1020	890	1320	1230	1095	570	1140
D-380/1080	108	165	700	1020	1695	900	1455	660	1260
D-380/1450	145	222	870	1020	1695	1070	1455	660	1580
D-380/1800	180	275	1040	1020	1695	1240	1455	660	1880
D-380/2180	218	333	1235	1020	1695	1435	1455	660	2190
D-380/2300	290	443	1575	1020	1695	1775	1455	660	2830

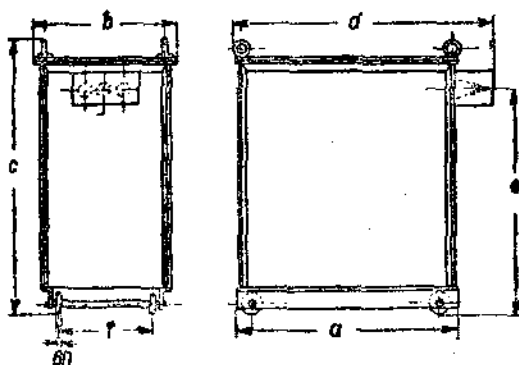
ТАБЛИЦА 175а.
Напряжение 500 V 50 пер/сек.

Т и п	Мощность kVA	Сила тока А	Размер mm						Вес kg
			a	b	c	d	e	f	
D-500/650	65	75	680	890	1 320	890	1 095	570	790
D-500/870	87	101	850	890	1 320	1 060	1 095	570	960
D-500/1090	109	126	1 020	890	1 320	1 230	1 095	570	1 110
D-500/1260	126	146	700	1 020	1 695	900	1 455	660	1 240
D-500/1680	168	194	870	1 020	1 695	1 070	1 455	660	1 540
D-500/2100	210	243	1 040	1 020	1 695	1 240	1 455	660	1 840
D-500/2500	250	290	1 235	1 020	1 695	1 435	1 455	660	2 140
D-500/3350	335	387	1 575	1 020	1 695	1 775	1 455	660	2 760

ТАБЛИЦА 175с.
Напряжение 3000 V 50 пер/сек.

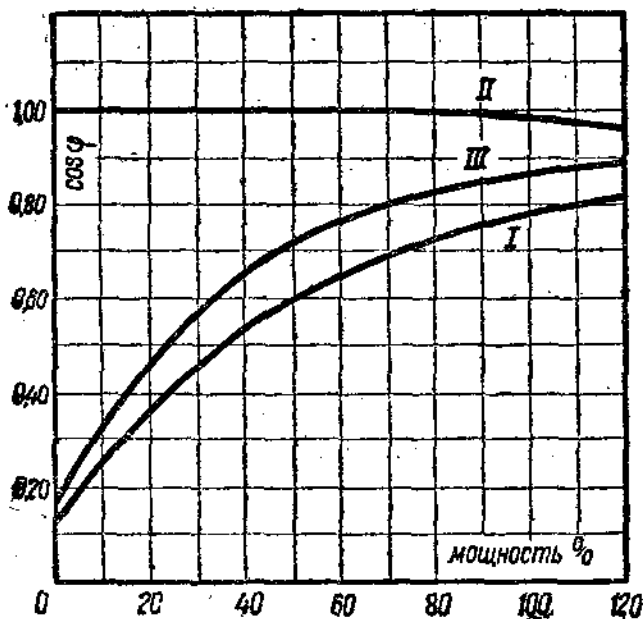
Т и п	Мощность kVA	Сила тока А	Размер mm						Вес kg
			a	b	c	d	e	f	
D-3000/920	92	17,7	850	890	1 320	1 060	1 095	570	925
D-3000/1760	176	34	870	1 020	1 695	1 070	1 455	660	1 470
D-3000/3500	350	67,5	1 575	1 020	1 695	1 775	1 455	660	2 620

где V_1 , V_3 , V_5 — напряжения основной, третьей, пятой и т. д. гармоник. В результате разноразличное значение этих токов может оказаться чрезвычайно высоким, затрудняя работу сети и генераторов и увеличивая падение напряжения. В таких случаях конденсатор может вызвать не улучшение, а ухудшение коэффициента мощности установки. Чтобы избежать этого явления, рекомендуется в сети с несинусоидальным напряжением последовательно с конденсатором включать дроссельную катушку, представляющую малое сопротивление для основной волны и значительное для высших гармоник. Включение индуктивного сопротивления резко уменьшает к. п. д. конденсатора (с 99 до 95—96%).



Фиг. 511.

Наконец, третий недостаток конденсатора может обнаружиться при неустановившемся режиме (при включении его в сеть) в виде



Фиг. 512.

возможности появления резонанса напряжения. Включение характеризуется всегда значительным увеличением силы тока, поэтому его необходимо производить через добавочное сопротивление, которое затем шунтируется специальными разъединителями. По данным практики иностранных предприятий опасаться резонанса не приходится.

Простота конструкции, компактность, высокий к. п. д. и сравнительно низкая (по сравнению с вращающимися конденсаторами) стоимость малых

мощностей делают статические конденсаторы очень удобными для увеличения $\cos \varphi$ небольших фабрично-заводских установок или отдельных асинхронных двигателей, к которым они

и подключаются параллельно через общий рубильник в соединении треугольником. В табл. 176 заимствованы из „Power Factor Wastas“ 1926 г. $\cos \varphi$ для различных двигателей при различных нагрузках, а на фиг. 512 показано изменение $\cos \varphi$ двигателя 2,2 kW при 220 V и 1500 об/мин в зависимости от его нагрузки как с подключенным конденсатором (кривые III и II), так и без него (кривая I). Кривая II относится к работе конденсатора без дросселя, кривая III — с дросселем.

ТАБЛИЦА 176.

№	Мощность двигателя HP	Конденсатор kVA	$\cos \varphi$		
			1/2 нагрузка	3/4 нагрузка	1/1 нагрузка
1	3	2	0,98	1,00	1,00
2	5	2	1,00	1,00	1,00
3	5	2	0,94	0,96	0,95
4	7,5	2	0,95	0,97	0,98
5	7,5	2	0,84	0,95	0,97
6	10	2	0,97	0,97	0,97
7	10	4	0,96	0,97	0,98
8	15	4	0,90	0,94	0,95
9	20	4	0,92	0,95	0,96
10	25	4	0,91	0,92	0,95
11	30	8	0,94	0,95	0,95
12	40	8	0,91	0,93	0,94
13	50	10	0,93	0,94	0,96
14	75	14	0,91	0,93	0,95
15	100	22	0,90	0,94	0,95
16	150	10	0,90	0,93	0,94
17	150	26	0,90	0,94	0,95
18	200	14	0,90	0,93	0,95
19	200	34	0,91	0,94	0,95

В случае исправления коэффициента мощности целой установки конденсатор следует включать между первичной стороной трансформатора и счетчиком. Подключение необходимо производить через автоматический выключатель. Сравнение по стоимости см. далее фиг. 563.

§ 6. Вращающиеся конденсаторы.

В крупных заводских установках увеличение $\cos \varphi$ статическими конденсаторами обходится очень дорого, поэтому приходится прибегать к более дешевым машинам безваттной мощности, к числу которых принадлежит синхронный конденсатор.

Таким конденсатором или компенсатором может служить обычный синхронный двигатель. Обращаясь к векторной диаграмме фиг. 513, изображающей работу синхронного двигателя при переменном возбуждении и постоянной мощности, находим следующее.

При постоянной мощности вектор электродвижущей силы, как известно, должен передвигаться так, чтобы его конец находился на прямой, параллельной вектору напряжения OA , так как перпенди-

составляющую $P_{\text{сн}}$, получим:

$$P_{\text{сн}} = P_{\text{сн}} = P_{\text{сн}} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (350'')$$

2) Если угол сдвига фаз φ надо только несколько уменьшить, например до величины φ_1 на фиг. 514, то составляющая, создаваемая синхронным компенсатором, должна быть равна

$$\overline{AB} - \overline{AC} = \overline{CB}.$$

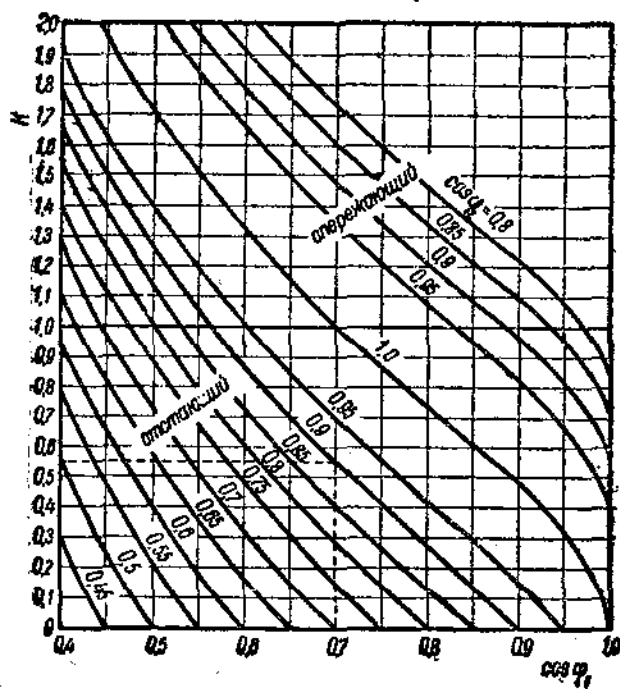
Синхронный конденсатор должен работать с опережающим током, которому соответствует мощность:

$$P_{\text{сн}} = \overline{CB} = P \sin \varphi - P \sin \varphi_1$$

или, выражая $P_{\text{сн}} = \overline{CB}$ через ваттную составляющую, получим:

$$P_{\text{сн}} = P_{\text{сн}} (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1). \quad (350''')$$

3) Если необходимо заставить установку работать с опережающим $\cos \varphi$, то мощность синхронного конденсатора должна быть



Фиг. 515

достаточна для создания емкостной составляющей, большей по абсолютному значению, чем безваттная составляющая $P_{\text{сн}}$, т. е. по фиг. 514:

$$P_{\text{сн}} = \overline{AB} + \overline{AD},$$

$$P_2 = P \cdot \sin \varphi + P' \cdot \sin \varphi_2$$

или, выражая через ваттную составляющую, получим:

$$P_2 = P_{\text{н}} (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_2). \quad (350)$$

Обобщая все три случая компенсации, можно прийти к общей формуле мощности синхронного конденсатора:

$$P_2 = P_{\text{н}} (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1). \quad (350)$$

если условиться считать значения тангенса угла сдвига в пределах отставания положительными и в пределах опережения отрицательными.

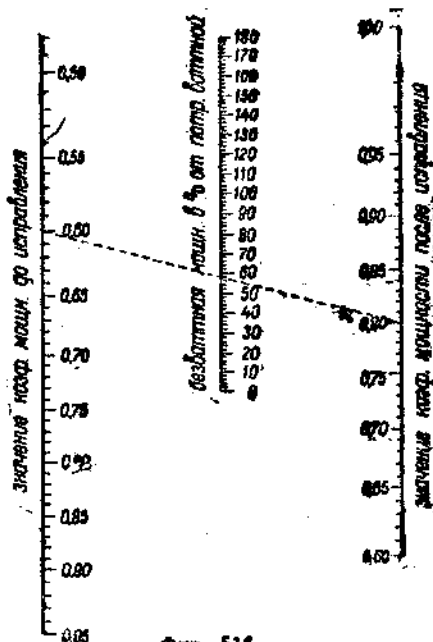
На фиг. 515 приведены кривые, построенные на основании формулы (350). По оси ординат отложено значение некоторого коэффициента k , представляющего разность $(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1)$. По оси абсцисс — значения $\cos \varphi$ до исправления. Значения $\cos \varphi_2$ после улучшения помечены на соответствующих кривых.

Например, если в установке мощностью 800 kW, работающей с $\cos \varphi = 0,7$, необходимо подобрать синхронный конденсатор так, чтобы общий коэффициент мощности повысился до 0,9, то (см. пунктир) коэффициент k получается равным 0,54. Следовательно, мощность синхронного конденсатора будет равна

$$0,54 \cdot 800 = 432 \text{ kVA}.$$

Для быстрых подсчетов еще удобнее номограммы. Приведенная на фиг. 516 номограмма позволяет простым соединением значений существующего $\cos \varphi$ до исправления (левая шкала) и после исправления (правая шкала) получить необходимую мощность компенсатора kVA в процентах от установленной мощности в kW. Это значение получается в пересечении линии, соединяющей оба значения $\cos \varphi$, со средней шкалой. Например, для повышения $\cos \varphi$ установки от значения 0,6 до 0,8 необходим конденсатор, мощность которого составляет 58% от мощности установки.

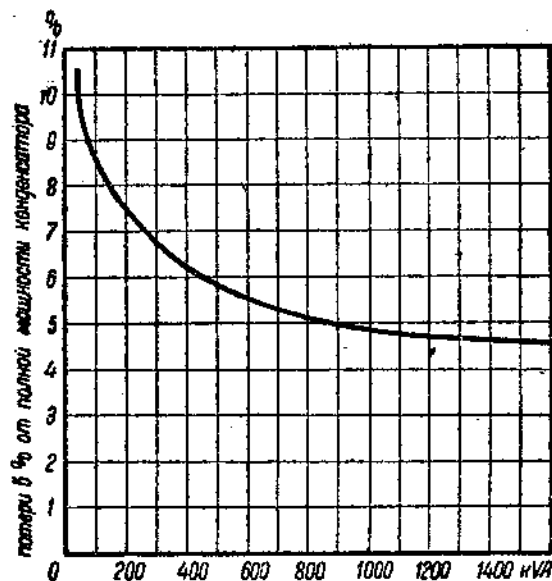
Так как конденсаторы потребляют почти исключительно безваттную опережающую мощность, ваттная же расходуется только на покрытие потерь холостого хода, то к. п. д. их довольно высок. На фиг. 517 показаны средние значения потребляемой мощности



Фиг. 516.

компенсаторов в процентах от полной мощности. Как видно, эти величины колеблются в пределах от 10 до 40%.

В настоящее время ВЭО уже разработало серию стандартных синхронных конденсаторов мощностью от 1000 до 25000 kVA



Фиг. 517.

с демпферной обмоткой для асинхронного пуска по системе Корндорфера с одной ступенью напряжения для машин до 750 kVA и с двумя—для более мощных. Станина статора, щиты и плита—сварные. Плита должна быть утоплена в фундаменте без болтов, так как синхронные конденсаторы не имеют механического привода и не несут ваттной нагрузки. Полуса и ярмо ротора штампованные.

Необходимо учитывать, что компенсатор, работая как машина безваттной мощности, увеличивает общий ток короткого замыкания. В особенности при существующих

типах автоматов с выдержкой времени наличие в сети крупных конденсаторов повлечет за собой увеличение размеров аварий от коротких замыканий, если не будут выработаны специальные мероприятия по мгновенному отключению места аварии от сети.

Для иллюстрации работы компенсаторов и их влияния на экономичность установки остановимся на следующем примере из практики.

Пример. Установка с асинхронными двигателями трехфазного тока, общей потребляемой мощностью 680 kW, разбита на 4 самостоятельных группы следующим образом:

Группа 1:	потребляемая мощность	230 kW, $\cos \varphi = 0,61$
" 2:	" "	195 kW, $\cos \varphi = 0,65$
" 3:	" "	140 kW, $\cos \varphi = 0,67$
" 4:	" "	115 kW, $\cos \varphi = 0,60$

Установка обслуживается одним трансформатором в 1000 kVA 6600/220 V. Двигатели установлены на напряжение 220 V.

Стоимость электрической энергии исчисляется при $\cos \varphi = 0,8$ в 7,5 коп/kWh.

Годовой расход энергии составляет 3 080 000 kWh при двухсменной работе по 16 час. в день.

Для определения общего коэффициента мощности составляем табл. 177.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_{\text{дл}}}{P_{\text{с}}} = \frac{837}{680} = 1,23,$$

чему соответствует общий коэффициент мощности

$$\cos \varphi = 0,63.$$

Данные трансформатора по каталогу:

ТАБЛИЦА 177.

№	Мощность ваттная P_w kW	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	Мощность безваттная $P_{\text{дл}} = P_w \cdot \operatorname{tg} \varphi$ kVA
1	230	0,61	1,30	300
2	195	0,65	1,17	228
3	140	0,67	1,11	156
4	115	0,60	1,33	153
	680	—	—	837

Напряжение короткого замыкания $V_k = 4,5\%$

Мощность холостого хода $P_0 = 4,2 \text{ kW}$

Падение напряжения при безиндукционной нагрузке $\Delta V = 1,25\%$

К. п. д. при безиндукционной нагрузке $\eta_1 = 98,35\%$

Падение напряжения при коэффициенте мощности 0,63 определится по формуле (343):

$$\begin{aligned} \Delta V_{\varphi} &= \sqrt{(4,5^2 - 1,25^2) (1 - 0,63^2) + 1,25 \cdot 0,63} = \\ &= \sqrt{18,7 \cdot 0,61} + 0,79 = 4,27\% \text{ или } 5,23 \text{ V.} \end{aligned}$$

Потери в меди по формуле (344):

$$\frac{1,25 \cdot 1000}{100} = 12,5 \text{ kW.}$$

К. п. д. при $\cos \varphi = 0,63$ [уравнение (345)]:

$$\eta_2 = \frac{1000 \cdot 0,63}{1000 \cdot 0,63 + 12,5 + 4,2} = 0,973 = 97,3\%.$$

Итак, к. п. д. трансформатора уменьшился на 1,08%.

Падение напряжения увеличивается. На зажимах вторичной обмотки будет иметь место напряжение

$$230 - 5,23 \cong 224,8 \text{ V.}$$

Учитывая падение в сети $\sim 5\%$, получим на клеммах двигателей напряжение 213 V вместо необходимых 220 V.

Коэффициент загрузки трансформатора равен

$$\eta_b = \frac{680}{1000 \cdot 0,63} = 1,08,$$

т. е. трансформатор работает в среднем с перегрузкой в 8%.

Использование же трансформатора далеко не полное, так как его нагрузка по ваттной мощности составляет только

$$\eta_b = \frac{680}{10000} = 0,68.$$

Посмотрим теперь, какие выгоды может дать улучшение коэффициента мощности. И: 5 вариантов:

- 1) $\cos \varphi = 0,70$; 2) $\cos \varphi = 0,80$; 3) $\cos \varphi = 0,86$;
4) $\cos \varphi = 0,96$ и 5) $\cos \varphi = 1,00$

найдем наимыгоднейший.

В первую очередь увеличение коэффициента мощности дает понижение коэффициента загрузки трансформатора, который соответственно будет равен:

$$1) \cos \varphi = 0,70; \quad \eta_k = \frac{680}{0,70 \cdot 1000} = 0,97.$$

$$2) \cos \varphi = 0,80; \quad \eta_k = \frac{680}{0,80 \cdot 1000} = 0,85.$$

$$3) \cos \varphi = 0,86; \quad \eta_k = \frac{680}{0,86 \cdot 1000} = 0,79.$$

$$4) \cos \varphi = 0,96; \quad \eta_k = \frac{680}{0,96 \cdot 1000} = 0,71.$$

$$5) \cos \varphi = 1,00; \quad \eta_k = \frac{680}{1,00 \cdot 1000} = 0,68.$$

Цифры показывают, что при более высоких коэффициентах мощности можно было бы обойтись меньшим трансформатором, что может привести к снижению стоимости электрической энергии, если плата за энергию взимается по двум составляющим, принятым в настоящее время в Ленинграде и Москве:

Установленная мощность трансформаторов	Оплата 1 kVA установлен. трансф. в год руб.
До 250 kVA . . .	92
250—500 kVA .	72
500—1 500 kVA .	48
Выше 1 500 kVA .	136

1) за каждый установленный kVA мощности трансформатора и 2) кроме того за каждый отпущенный kWh. Первая, постоянная часть тарифа особенно сильно отзывается на мелких промышленных установках, и потому снижение ее может дать ощутительную годовую экономию (см. табл. 178, принятую в Ленинграде „Электротокком“).

Кроме того повышение коэффициента мощности увеличивает использование сети, давая возможность добавочного подключения двигателей.

Чтобы поднять коэффициент мощности данной установки, можно применить синхронный или статический конденсатор. Мощность того и другого по формуле (350): для $\cos \varphi = 0,7$:

$$P_k = 680 (1,23 - 1,00) = 157 \text{ kVA}.$$

(Такие же результаты дают кривые фиг. 510, 515 и номограмма фиг. 516.) Аналогично для других вариантов:

$$\cos \varphi = 0,80; \quad P_k = 326 \text{ kVA}.$$

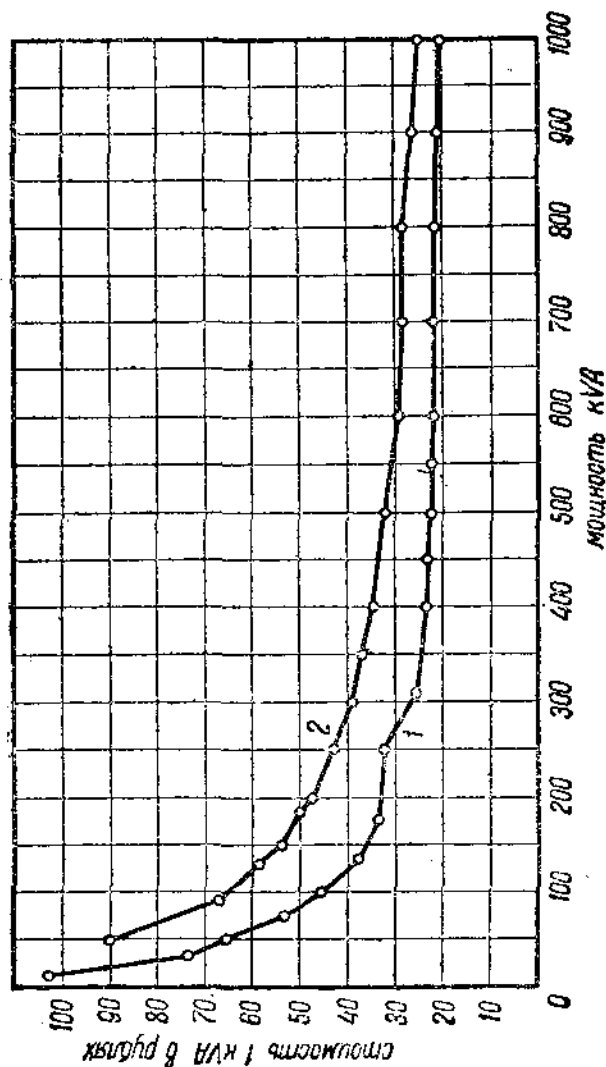
$$\cos \varphi = 0,86; \quad P_k = 435 \text{ „}$$

$$\cos \varphi = 0,96; \quad P_k = 620 \text{ „}$$

$$\cos \varphi = 1,00; \quad P_k = 835 \text{ „}$$

Для определения стоимости синхронных конденсаторов можно воспользоваться кривыми фиг. 518, построенными для конденсаторов Сименса-Шуккерт (кривая 1) и конденсаторов ВЭО (кривая 2).

Для случая $\cos \varphi = 0,70$ стоимость синхронного конденсатора мощностью 150 kVA определяется в 8150 руб. (фиг. 518, кривая 2).



Фиг. 518.

Для $\cos \varphi = 0,80$ стоимость синхронного конденсатора мощностью 350 kVA будет 13 000 руб.

Для $\cos \varphi = 0,86$ — синхронный конденсатор 450 kVA стоит 14 500 руб.

Для $\cos \varphi = 0,96$ — синхронный конденсатор 650 kVA стоит 18 500 руб.

Для $\cos \varphi = 1,00$ — синхронный конденсатор 900 kVA стоит 22 500 руб.

Стоимость установки учитываем по инструкции Главэлектро в 15% от стоимости машины. Исчисляя ежегодные косвенные расходы в 15% от полной стоимости компенсирующей установки, получим для каждого случая:

при $\cos \varphi = 0,70$	1410 руб.
" $\cos \varphi = 0,80$	2250 "
" $\cos \varphi = 0,86$	2500 "
" $\cos \varphi = 0,96$	3230 "
" $\cos \varphi = 1,00$	3890 "

Кроме косвенных расходов, необходимо учесть стоимость энергии, потребляемой вращающимися конденсаторами.

По кривой фиг. 517 мощность, затрачиваемая на вращение конденсатора

мощностью 150 kVA, равна $P = 150 \cdot 0,087 = 13,1$ kW	
" 350 " " $P = 350 \cdot 0,065 = 22,7$ "	
" 450 " " $P = 450 \cdot 0,060 = 27,0$ "	
" 650 " " $P = 650 \cdot 0,054 = 35,0$ "	
" 900 " " $P = 900 \cdot 0,050 = 45,0$ "	

При 300 рабочих днях или 4800 час. работы в году (две смены) дополнительный расход энергии:

при $\cos \varphi = 0,70$	$13,1 \cdot 4800 = 62800$ kWh
" $\cos \varphi = 0,80$	$22,7 \cdot 4800 = 109000$ "
" $\cos \varphi = 0,86$	$27,0 \cdot 4800 = 144000$ "
" $\cos \varphi = 0,96$	$35,0 \cdot 4800 = 167000$ "
" $\cos \varphi = 1,00$	$45,0 \cdot 4800 = 215500$ "

Согласно табл. 168*) стоимости 1 kWh для различных $\cos \varphi$:

$\cos \varphi = 0,70$	3,92 коп.
$\cos \varphi = 0,80$	3,7 "
$\cos \varphi = 0,86$	3,5 "
$\cos \varphi = 0,96$	3,33 "
$\cos \varphi = 1,00$	3,33 "

Стоимость электрической энергии, израсходованной на вращение синхронных конденсаторов за 1 год, будет:

при $\cos \varphi = 0,70$	$62800 \cdot 3,92 = 2460$ руб.
" $\cos \varphi = 0,80$	$109000 \cdot 3,7 = 4020$ "
" $\cos \varphi = 0,86$	$144000 \cdot 3,5 = 5040$ "
" $\cos \varphi = 0,96$	$167000 \cdot 3,33 = 5550$ "
" $\cos \varphi = 1,00$	$215500 \cdot 3,33 = 7150$ "

Полные ежегодные расходы, связанные с установкой синхронных конденсаторов, будут:

при $\cos \varphi = 0,70$	$1410 + 2460 = 3870$ руб.
" $\cos \varphi = 0,80$	$2250 + 4020 = 6270$ "
" $\cos \varphi = 0,86$	$2500 + 5040 = 7540$ "
" $\cos \varphi = 0,96$	$3230 + 5550 = 8780$ "
" $\cos \varphi = 1,00$	$3890 + 7150 = 11040$ "

*) Критика цифрового обоснования „штрафных“ тарифов не составляет, конечно, задачи настоящего труда.

Основной расход на электрическую энергию составляет:

при $\cos \varphi = 0,70$	. . .	3 080 000 · 3,92	= 121 000 руб.
„ $\cos \varphi = 0,80$	. . .	3 080 000 · 3,7	= 114 000 „
„ $\cos \varphi = 0,86$	. . .	3 080 000 · 3,5	= 108 000 „
„ $\cos \varphi = 0,96$	. . .	3 080 000 · 3,33	= 101 000 „
„ $\cos \varphi = 1,00$	. . .	3 080 000 · 3,33	= 101 000 „

Итого полные годовые расходы составят:

при $\cos \varphi = 0,70$	. . .	3 870 + 121 000	= 124 870 руб.
„ $\cos \varphi = 0,80$	. . .	6 270 + 114 000	= 120 270 „
„ $\cos \varphi = 0,86$	. . .	7 540 + 108 000	= 115 540 „
„ $\cos \varphi = 0,96$	. . .	8 780 + 102 000	= 110 780 „
„ $\cos \varphi = 1,00$	. . .	14 040 + 102 000	= 116 040 „

При существующих условиях, т. е. $\cos \varphi = 0,63$, стоимость 1 kWh определяется по табл. 168 в 4,2 коп., что при годовом расходе энергии в 3 080 000 kWh составит 128 000 руб.

Итак, полная экономия от улучшения $\cos \varphi$ достигает по сравнению с существующим режимом работы:

при $\cos \varphi = 0,70$	. . .	128 000 — 124 870	= 3 130 = 2,4%
„ $\cos \varphi = 0,80$	. . .	128 000 — 120 270	= 7 730 = 6,1%
„ $\cos \varphi = 0,86$	. . .	128 000 — 115 540	= 12 460 = 9,7%
„ $\cos \varphi = 0,96$	. . .	128 000 — 110 780	= 17 220 = 13,5%
„ $\cos \varphi = 1,00$	. . .	128 000 — 116 040	= 12 960 = 10,0%

Результаты представлены кривой фиг. 519 в процентах от годовой стоимости энергии 128 000 руб. (без исправления коэффициента мощности).

Как видно, в данном случае наибольшая экономия достигается в пределах коэффициента мощности 0,96. За пределами 0,96 в сторону 1,0 идет резкое убывание экономии.

Действительно, на практике увеличение коэффициента мощности выше значения 0,95—0,96 бывает выгодно в редких случаях.

§ 7. Одновременное использование синхронной машины в качестве двигателя и фазокомпенсатора.

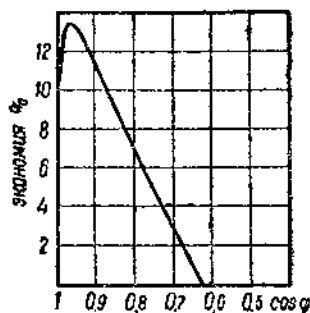
Вопрос о выборе мощности синхронного конденсатора чаще ставится перед проектирующим в такой форме:

Дана общая ваттная нагрузка завода мощностью P , kW при коэффициенте мощности $\cos \varphi_1$, который надлежит скомпенсировать до величины $\cos \varphi_2$.

Задача может быть разрешена в трех вариантах:

1) Установить специальный синхронный конденсатор, работающий вхолостую и потребляющий при этом исключительно опережающую безваттную мощность.

2) Снять часть асинхронных двигателей и заменить их синхронными на ту же ваттную мощность, заставив последние работать



Фиг. 519.

в перевозбужденном состоянии с целью компенсировать до заданной величины φ_2 угол отставания φ_1 , обусловленный безваттной мощностью оставленных асинхронных двигателей.

3) Установить на вновь оборудуемых приводах синхронные двигатели, предусмотрев работу их в перевозбужденном состоянии с целью компенсации коэффициента мощности завода до заданной величины $\cos \varphi_2$.

В двух первых вариантах общая ваттная нагрузка завода не изменяется, а в третьем варианте она увеличивается на величину ваттной мощности вновь оборудуемых приводов.

Обратимся к сравнению общих кажущихся мощностей, проектируемых к установке синхронных машин по трем перечисленным вариантам.

Вариант 1. Если общая ваттная нагрузка завода равна $P_w \text{ kW} = \overline{OA}$ (фиг. 520а), а угол отставания по фазе всего потребляемого заводом тока от напряжения равен φ_1 , то безваттная мощность, потребляемая заводом, согласно фиг. 520а, будет:

$$P'_{bl} = P_w \operatorname{tg} \varphi_1 = \overline{AB}.$$

При новом значении коэффициента мощности $\cos \varphi_2$ безваттная мощность будет:

$$P''_{bl} = P_w \operatorname{tg} \varphi_2 = \overline{AF}.$$

Следовательно, потребная мощность синхронного конденсатора P_k в этом случае выразится (формула 350):

$$P_k = \Delta P_{bl} = P'_{bl} - P''_{bl} = P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = \overline{BF}.$$

Вариант 2. Положим (фиг. 520а) общую ваттную нагрузку завода равной $P_w = \overline{OA}$, а безваттную $P'_{bl} = \overline{AB} = P_w \operatorname{tg} \varphi_1$. Допустим, что часть ваттной нагрузки, равная $\Delta P_w = \overline{CA}$, будет снята, а оставшиеся асинхронные двигатели на общую ваттную мощность $P_w - \Delta P_w = \overline{OC}$ будут работать с прежним коэффициентом мощности $\cos \varphi_1$; в таком случае их отстающая безваттная мощность будет $P'_{bl} = (P_w - \Delta P_w) \operatorname{tg} \varphi_1 = \overline{CD}$. Если снятые асинхронные двигатели будут заменены синхронными, работающими при $\cos \varphi = 1$, то ваттная мощность вновь будет равна $P_w = \overline{OC} + \overline{CA}$, причем $\overline{CA} = \overline{DE}$, а безваттная $P''_{bl} = \overline{CD} = \overline{AE}$. При этом полная кажущаяся мощность станет равной $\overline{OE} = \overline{OA} + \overline{AE}$, а коэффициент мощности

$$\cos \varphi_3 = \frac{\overline{OA}}{\overline{OE}} = \frac{P_w}{\sqrt{P_w^2 + (P_w - \Delta P_w)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_1}}.$$

Чтобы довести коэффициент мощности до заданного значения $\cos \varphi_2$, необходимо, очевидно, перевозбудить синхронные двигатели таким образом, чтобы потребляемая ими опережающая безваттная мощность стала равна

$$P_k = \Delta P_{bl} = \overline{EF} = AE - AF = (P_w - \Delta P_w) \operatorname{tg} \varphi_1 - P_w \operatorname{tg} \varphi_2 = \\ = P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) - \Delta P_w \operatorname{tg} \varphi_1.$$

При таком условии общая кажущаяся мощность синхронных двигателей будет:

$$\Delta P = \overline{DF} = \overline{DE} + \overline{EF} = \sqrt{\Delta P_w^2 + [(P_w - \Delta P_w) \operatorname{tg} \varphi_1 - P_w \operatorname{tg} \varphi_2]^2}.$$

Дифференцируя ΔP по ΔP_w и приравнявая производную нулю, получим уравнение для определения ΔP_w , при котором ΔP будет минимальным:

$$\frac{d\Delta P}{d\Delta P_w} = \frac{\Delta P_w + [(P_w - \Delta P_w) \operatorname{tg} \varphi_1 - P_w \operatorname{tg} \varphi_2] \times}{\sqrt{\Delta P_w^2 + [(P_w - \Delta P_w) \operatorname{tg} \varphi_1 - P_w \operatorname{tg} \varphi_2]^2}} \times \\ \times \frac{1}{2} \cdot \frac{2\Delta P_w + 2[(P_w - \Delta P_w) \operatorname{tg} \varphi_1 - P_w \operatorname{tg} \varphi_2](-\operatorname{tg} \varphi_1)}{\Delta P_w^2 + [(P_w - \Delta P_w) \operatorname{tg} \varphi_1 - P_w \operatorname{tg} \varphi_2]^2} = 0$$

или

$$\frac{\Delta P_w - [(P_w - \Delta P_w) \operatorname{tg} \varphi_1 - P_w \operatorname{tg} \varphi_2] \operatorname{tg} \varphi_1}{\sqrt{\Delta P_w^2 + [(P_w - \Delta P_w) \operatorname{tg} \varphi_1 - P_w \operatorname{tg} \varphi_2]^2}} = 0,$$

откуда

$$\Delta P_w = P_w \frac{\operatorname{tg}^3 \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1} = P_w \operatorname{tg} \varphi_1 \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1}.$$

Подставляя это значение ΔP_w в выражение безваттной мощности конденсаторов, найдем:

$$P_k = \Delta P_{bl} = \overline{EF} = P_w \left(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg}^2 \varphi_1 \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1} \right) = P_w \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1}.$$

Отсюда следует:

$$\Delta P = \sqrt{\Delta P_w^2 + \Delta P_{bl}^2} = P_w \sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2 \varphi_1 - \operatorname{tg}^2 \varphi_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1}} = \\ = P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1. \quad (351)$$

Так как

$$P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = \overline{FB},$$

то

$$\Delta P = \overline{FB} \cdot \cos \varphi_1.$$

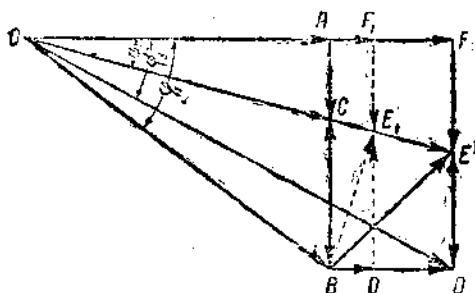
Отсюда следует такое графическое построение минимальной мощности ΔP : опускаем из точки F на направление $\overline{OB}$ перпендикуляр $\overline{FD}_1$; тогда угол $\angle BFD_1 = \varphi_1$, и, следовательно:

$$\overline{FB} \cdot \cos \varphi_1 = \Delta P_{\min} = \overline{D_1F},$$

причем

$$D_1 E_1 = C_1 A = \Delta P_{w \min}, \text{ а } E_1 F = \Delta P_{bl \min}.$$

Вариант 3. Пусть на фиг. 520b вектора: $\overline{OA} = P_w$; $\overline{AB} = P_{bl}$; $\overline{OB} = P$; $\frac{OA}{OB} = \cos \varphi_1$. Обозначим через $\Delta P_w = AF$ ваттную мощность вновь оборудуемых приводов. Если эти приводы будут электрифицированы посредством синхронных двигателей, работающих при $\cos \varphi = 1$, то общая ваттная мощность завода станет равной $P_w + \Delta P_w = \overline{OA} + \overline{AF} = \overline{OF}$, причем пусть $\overline{AF} = \overline{BD}$. В таком случае безваттная мощность останется попрежнему равной $\overline{AB} = \overline{FD}$, так что новый коэффициент мощности будет: $\cos \varphi_2 = \frac{OF}{OD}$, где $OD = \sqrt{(P_w + \Delta P_w)^2 + P_{bl}^2}$ есть новая полная кажущаяся мощность. Чтобы получить новый коэффициент мощности равным



Фиг. 520 б

$\cos \varphi_2$, необходимо перевозбудить устанавливаемые синхронные двигатели таким образом, чтобы потребляемая ими опережающая безваттная мощность стала равной

$$\begin{aligned} \overline{DE} = \Delta P_{bl} &= FD - FE = AB - FE = P_w \operatorname{tg} \varphi_1 - (P_w + \Delta P_w) \operatorname{tg} \varphi_2 = \\ &= P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) - \Delta P_w \operatorname{tg} \varphi_2. \end{aligned}$$

При таком условии полная кажущаяся мощность синхронных двигателей будет:

$$\Delta P = \sqrt{\Delta P_w^2 + \Delta P_{bl}^2} = \sqrt{\Delta P_w^2 + [P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) - \Delta P_w \operatorname{tg} \varphi_2]^2}.$$

Дифференцируя ΔP по ΔP_w и приравнявая производную нулю, получим такое значение ΔP_w , при котором ΔP будет минимальным:

$$\frac{d(\Delta P)}{d(\Delta P_w)} = \frac{\Delta P_w - [P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) - \Delta P_w \operatorname{tg} \varphi_2] \cdot \operatorname{tg} \varphi_2}{\sqrt{\Delta P_w^2 + [P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) - \Delta P_w \operatorname{tg} \varphi_2]^2}} = 0,$$

откуда

$$\Delta P_w = P_w \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_2 (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2} = P_w \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \sin \varphi_2 \cdot \cos \varphi_2;$$

следовательно,

$$\begin{aligned}\Delta P_{b1} &= P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) - \Delta P_w \operatorname{tg} \varphi_2 = P_w \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2} \\ &= P_w \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_2,\end{aligned}$$

так что:

$$\Delta P = \sqrt{\Delta P_w^2 + \Delta P_{b1}^2} = P_w \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_2. \quad (352)$$

Так как $P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = \overline{CB}$, то для построения ΔP опускаем из точки B перпендикуляр BE_1 на направление OE ; тогда угол $CBE_1 = \varphi_2$, и, следовательно, $BE_1 = BC \cos \varphi_2 = \Delta P_{\min}$; кроме того тогда

$$\begin{aligned}\overline{AF_1} = BD_1 &= \Delta P_{\min} \sin \varphi_2 = BC \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin \varphi_2 = \\ &= P_w \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_2 \sin \varphi_2 = \Delta P_w (\sin \varphi_2)\end{aligned}$$

и

$$D_1E_1 = \Delta P_{\min} \cdot \cos \varphi_2 = BC \cdot \cos^2 \varphi_2 = P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_2 = \Delta P_{b1 \min}.$$

Сравнивая выражения, полученные для ΔP по каждому из трех рассмотренных вариантов, получаем:

$$\Delta P_1 = P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2), \quad (350)$$

$$\Delta P_2 = P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1, \quad (351)$$

$$\Delta P_3 = P_w (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_2, \quad (352)$$

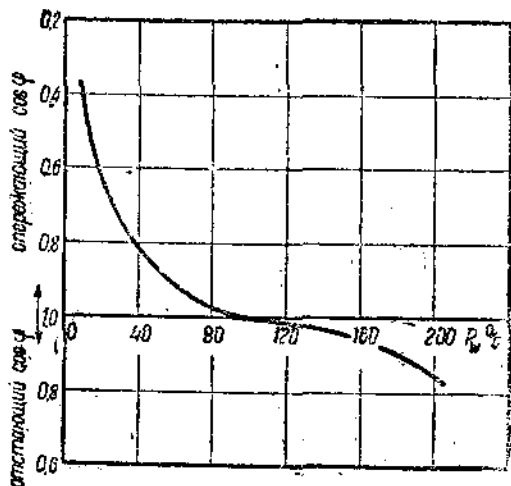
откуда следует:

$$\Delta P_1 : \Delta P_2 : \Delta P_3 = 1 : \cos \varphi_1 : \cos \varphi_2.$$

Так как $\varphi_1 > \varphi_2$, то $\cos \varphi_1 < \cos \varphi_2$, и, следовательно

$$\Delta P_2 < \Delta P_3 < \Delta P_1.$$

Следует заметить, что при работе синхронной машины одновременно и в качестве двигателя и в качестве компенсатора, ее коэффициент мощности не остается постоянным, а изменяется вместе с изменением нагрузки на валу. Если возбуждение двигателя подобрано так, что при полной нагрузке его коэффициент мощности равен 1, то при перегрузке, вследствие увеличения потока рассеяния, двигатель будет работать как индуктивная нагрузка, потребляя из сети отставший безваттный ток.



Фиг. 521.

При недогрузке двигатель ведет себя как емкость, посылая отстающий безваттный ток в сеть и исправляя этим коэффициент мощности всей установки. Из графика (фиг. 521) видно изменение свойств двигателя при переменной нагрузке и постоянном возбуждении.

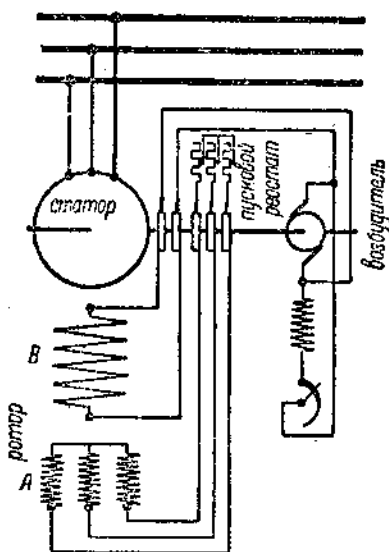
Так как в этом случае в одной машине соединяются двигатель и компенсатор, то такое решение оказывается значительно дешевле дополнительной установки специального синхронного компенсатора (или иначе синхронного конденсатора).

Однако нормальный синхронный двигатель долгое время не получила практике распространения по причине некоторых механических свойств. В предыдущих главах неоднократно упоминалось о том, что синхронный двигатель не в состоянии развить достаточного для пуска привода начального момента даже при наличии клетки Леблана.

Поэтому нормальный синхронный двигатель может быть применен только в тех случаях, когда пуск совершается вхолостую, например в приводах мотор-генераторов или центробежных вентиляторов и насосов, пускаемых при закрытой задвижке, т. е. без нагрузки. По опытным данным начальный момент такого двигателя не превышает 0,3 нормального момента, при пусковом токе 1,5—2,5 нормального. Вторым недостатком — жесткостью характеристики синхронных двигателей. Наконец, нужно отметить чувствительность синхронных двигателей к перегрузке, при которой они выпадают из фазы и останавливаются.

Чтобы несколько расширить область применения синхронных двигателей, были предприняты некоторые изменения в их конструкции, главным образом в направлении увеличения начального момента.

Последнее достигается двойной обмоткой ротора. Одна из них представляет нормальную роторную обмотку трехфазного асинхронного двигателя, выполненную либо в виде беличьего колеса, либо в виде фазной обмотки (фиг. 522, обмотка А), концы которой выведены к трем пусковым кольцам, замыкающимся через щетки на реостат. Вторая обмотка В — нормальная обмотка возбуждения синхронного двигателя. Ротор выполняется как для синхронного мотора, только с небольшими расстояниями между отдельными полюсными башмаками. Первая (пусковая) обмотка закладывается в пазы, прорезанные в полюсных башмаках. Пуск двигателя производится как обыкновенного асинхронного, с фазовой обмоткой ротора. После достижения нормальной асинхронной скорости вторая обмотка подключается к источнику постоянного тока, например к возбудителю, насаженному на вал двигателя, и последний вступает

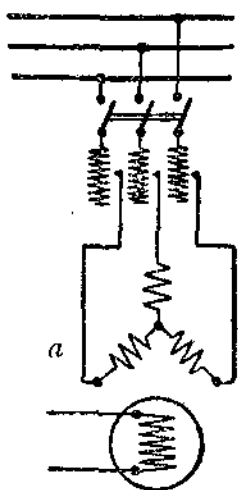


Фиг. 522.

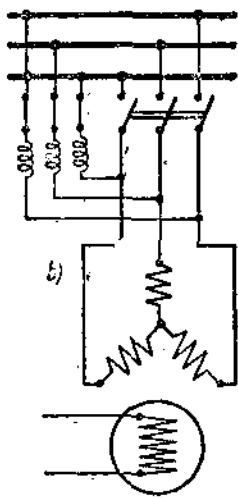
в синхронизм, продолжая работать как синхронный. Замкнутая накоротко пусковая обмотка работает в качестве демпфера.*)

В случае короткозамкнутой обмотки двигатель пускается либо непосредственным включением на полное напряжение, либо от пониженного напряжения через автотрансформатор (фиг. 523, а), либо через дроссельную катушку (там же, б).

В проектировании синхронных двигателей нового промышленного типа с самопуском и усиленным пусковым моментом приходится искать наиболее выгодное решение, выбирая (соответственно конкретным условиям работы привода) между исключаящими



Фиг. 523 а.



Фиг. 523 б.

друг друга требованиями большой перегрузочной способности

$p_m = \frac{P_{\max}}{P_{\text{ном}}}$, большого пускового момента M_A при малом пусковом токе и большого „синхронизирующего“ момента M_{σ} .

(Этот последний играет громадную роль, так как „втягивает“ ротор в синхронизм после достижения асинхронной скорости; условно его характеризуют величиной вращающего момента двигателя при скорости около 95% от синхронной, при которой обычно включается возбуждение постоянного тока.)

Действительно, если для увеличения перегрузочной способности p_m увеличить междужелезное пространство и уменьшить реакцию якоря, то это вызовет увеличение намагничивающего тока и тока короткого замыкания (установившегося) и уменьшение пускового момента M_A . Можно было бы достичь увеличения p_m , рассчитав двигатель на опережающий $\cos \varphi$, а не на $\cos \varphi = 1$, но это вызовет увеличение расхода меди. Практически наиболее выгодное соотношение между M_A и M_{σ} устанавливается соответствующим подбором соотношения ампервитков статора и возбуждения.

*) Подробное описание схемы и процесса пуска см. статью автора в журнале „Стандартуголь“, 1932, № 1 — 2, 3 и далее.

С другой стороны, требования больших M_A и M_s также противоречивы: если, например, в целях увеличения M_A увеличить сопротивление „пусковой“ обмотки, уложенной в полюсных башмаках, то „синхронизирующий“ втягивающий момент M_s уменьшится, так как асинхронная механическая характеристика момента, создаваемого этой обмоткой, пойдет соответственно круче, и вращающий момент при полной скорости будет меньше. Это второе противоречие разрешается, однако, гораздо легче — укладкой обмотки в „глубокие“ пазы, о чем уже говорилось выше, в главе IV, или специальной формой проводов обмотки в виде медной трубки с железным стержнем внутри.

Для характеристики синхронных двигателей производства ГЕС можно привести нижеследующую сводку инж. Л. А. Уманского соотношений пускового синхронизирующего и опрокидывающего моментов, выраженных в процентах от нормального момента, применительно к различным типовым для этих двигателей приводам:

M_A	M_s	M_k	Наименование привода
(в процентах)			
40	40	140	Компрессор поршневой среднего давления
40—80	40—80	140—175	Компрессор поршневой низкого давления
40	40	140	Насос поршневой
30—40	60—110	150	„ центробежный
15—40	50—120	150—175	Компрессор центробежный
50	50	150	Бумажная машина
140—150	100—120	150—175	Шаровая машина
150—175	100—120	200—250	Дробилка
100—120	100	200—250	Валки для размола
140—175	100—120	200—250	Угольная мельница
50	50	до 300	Металлургическая промышлен.

Для типовых синхронных двигателей можно принять $M_A = 1,5—1,75 M_{ном}$ и $M_s = (1,0—1,25) M_{ном}$, чем больше число полюсов, т. е. чем тихоходнее двигатель, тем больше реактивность и тем меньше M_A и i_A .

Итак, путем устройства специальной пусковой обмотки удалось довести начальный вращающий момент синхронного двигателя до величины, равной пусковому моменту нормального асинхронного двигателя. Синхронный опрокидывающий момент, при котором двигатель выпадает из фазы, доведен в современных синхронных двигателях до 200—250%, что делает их пригодными для ударной нагрузки. Американская практика дает многочисленные примеры приводов прокатных станов от синхронных двигателей.

В то время как обычный синхронный двигатель по достижении опрокидывающего момента выпадает из фазы и останавливается, этот двигатель продолжает работать благодаря добавочной обмотке

как короткозамкнутый асинхронный, но при отключении обмотки возбуждения перестает действовать как компенсатор сдвига фаз.

После окончания перегрузки двигатель может быть вновь введен в синхронизм включением обмотки возбуждения.

Как уже было сказано в главе IV, синхронные двигатели с самопуском приобрели широкое применение во всех отраслях промышленности, а главным образом в металлургической, благодаря достигнутым за последние годы ценным свойствам. К таковым надо отнести:

а) меньшую, чем у асинхронных двигателей, чувствительность к колебаниям напряжения в сети, так как при $\Phi = \text{const}$, $M_m \equiv V$, в то время как у асинхронных $M_m \equiv V^2$;

б) междужелезное пространство можно допустить в несколько раз большим, чем у асинхронных двигателей, что имеет громадное значение в отношении надежности;

в) низкое число оборотов легче осуществить при хорошем $\cos \varphi$, чем для асинхронного двигателя, что может дать экономию на промежуточной механической передаче;

г) синхронный двигатель легче построить на высокое напряжение, чем асинхронный двигатель;

е) при крупных мощностях он несколько компактнее (см. далее табл. 194).

К недостаткам этого двигателя следует отнести: а) сложность пуска, вызывающую необходимость автоматического кнопочного управления; ручное не рекомендуется; б) несколько более высокую стоимость его вследствие дополнительной обмотки (см. табл. 179 для двигателей Сименс-Шуккерта и табл. 179а — фирмы GEC), а также в) усиление аварии при коротком замыкании в сети (аналогично синхронному компенсатору), наконец, д) возможность „качаний“, о средствах устранения которых было сказано выше в главе IV первого тома.

ТАБЛИЦА 179.

Мощн. кВт	Число об/мин	Напря- жение V	Вес kg	К. п. д. %	Маховой момент GD ² kgm	Цена руб.
4,5	1500	125, 220, 380, 500	206	76,5	1,0	1410
8			340	79,5	1,6	1700
14			395	83,5	2,1	1800
22			505	86,5	3,6	2020
32			580	88,5	4,5	2180
47			765	89,5	6,0	2800
62			895	90,5	12,8	3120
78			1015	91,5	15,5	3360
95			1250	91,5	25,0	3800
120			1380	92,0	30,0	4050

Мощн. kW	Число об/мин	Напря- жение V	Вес kg	К. п. д. %	Маховой момент DG ² kgm	Цена Руб.
17 25 36 45 62	1 000	125 220 380 500	530 620 770 920 1 050	84,5 86,5 88,5 89,5 90,0	3,8 4,8 9,0 14,0 17,0	2 130 2 300 3 000 3 300 3 600
78		220	1 225	90,5	28,0	4 300
96		380	1 340	90,5	32,0	4 700
125		500	1 650	91,5	40,0	5 100
160			2 310	92,5	65,0	6 000
185			2 600	93,5	75	6 500
235		320	3 550	94,0	90	8 150
300		320	3 430	94,5	185	7 850
380		500	3 940	94,5	230	8 600
32 40 54	750	125 220 380 500	780 975 1 085	87,5 88,0 89,0	17 28 32	3 100 3 700 3 920
68			1 240	89,5	46	4 500
82		220	1 440	91,0	54	5 050
110		380	1 715	91,0	67	5 600
140		500	2 485	91,0	95	6 500
165			2 760	92,5	110	6 900
200			2 945	93,0	125	7 300
235			3 380	93,5	190	8 500
300		380	4 660	94,0	225	10 800
375		500	5 580	94,5	355	12 500
470			6 185	94,5	430	13 200
600		500	5 460	95,0	540	12 500
185	600	380	3 530	92,5	190	8 600
235		500	3 870	93	240	9 200
300			4 430	93,5	390	10 500
375			6 390	94	470	13 500
470		500	7 180	94,5	570	15 000

Мощн. kW	Число об/мин	Напря- жение V	Вес kg	К. п. д. %	Маховой момент GD ² kgm	Цена Руб.
40	1 500	3 000	765	88,5	8	3 050
54			895	39,5	12,8	3 400
68			1 015	90,5	15,5	3 600
95			1 250	91,5	25	4 050
120			1 380	90,5	30	4 500
80	1 500	5 000	1 250	92,0	25	4 450
95			1 380	91,0	30	5 700
28	1 000	3 000	770	87,5	9	3 150
40			920	88,5	14	3 500
52			1 050	89	17	3 900
73			1 225	90	28	4 600
86			1 340	90	32	5 000
125			1 650	91,5	40	5 400
160			2 310	92,5	65	6 300
86		3 000 6 000	1 240	90	32	5 400
125			1 650	91,5	40	5 900
160			2 310	92,5	65	6 700
185			2 600	93,5	75	7 300
235			3 550	94	90	9 000
300			3 430	94,5	185	8 800
380			3 940	94,5	230	9 500

ТАБЛИЦА 179а.

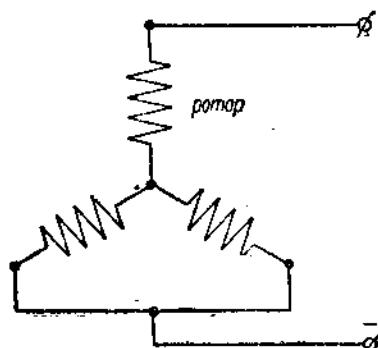
Стоимости синхронных двигателей ГЭС до 500 V.

Мощность kW при cos φ = 1	Стоимость дви- гателя		Стоимость двигателей с пусковым приспособл.			
			Пуск с пониженным напряжением		Пуск при полном напряжении	
	Долл.	Руб.	Долл.	Руб.	Долл.	Руб.
			1 000 об/мин			
18,5	410	1 320	1 054	3 400	694	2 520
22	440	1 410	1 085	3 485	729	2 636
30	480	1 540	1 135	3 650	780	2 500
37	550	1 760	1 180	3 700	825	2 640

Мощность kW при $\cos \varphi = 1$	Стоимость двигателя		Стоимость двигателей с пусковым приспособл.			
			Пуск с пониженным напряжением		Пуск при полном напряжении	
	Долл.	Руб.	Долл.	Руб.	Долл.	Руб.
1 000 об/мин						
44	580	1 800	1 198	3 850	922	2 950
55	600	1 920	1 247	4 000	974	3 100
118	960	3 000	1 946	6 800	1 455	4 670
750 об/мин						
22	470	1 500	1 120	3 600	764	2 420
30	520	1 670	1 178	3 780	823	2 635
37	560	1 800	1 253	4 040	898	2 880
44	600	1 920	1 279	4 100	1 003	3 300
55	652	2 100	1 331	4 270	1 067	3 440
75	730	2 340	1 590	5 100	1 199	3 820
92	800	2 570	1 667	5 350	1 291	4 150
110	864	2 780	1 695	5 440	1 309	4 200
148	990	3 180	1 976	6 350	1 485	4 760
600 об/мин						
75	860	2 750	1 727	5 550	1 336	4 300
92	930	3 140	1 853	5 950	1 477	4 740

§ 8. Синхронизированные асинхронные двигатели.

Стремление сохранить ценные свойства асинхронного двигателя в отношении пуска и синхронного в отношении $\cos \varphi$ привело к созданию особого рода двигателя, так называемого „синхронизированного асинхронного двигателя“. Сущность его заключается в следующем: каждый асинхронный двигатель с контактными кольцами может быть обращен в синхронный путем включения в цепь ротора источника постоянного тока, например по схеме Даниельсона (фиг. 524). Возбужденный таким образом двигатель будет работать как синхронный и обладать всеми свойствами его.



Фиг. 524.

Для получения этой схемы к нормальному асинхронному двигателю необходимо придать специальный возбуждатель, развивающий необходимую мощность при небольшом напряжении (так как сопротивление обмотки ротора незначительно). При пользовании песторенным источником тока, почти всегда имеющимся на предприятии, последовательно

с обмоткой ротора должно быть обязательно включено большое добавочное сопротивление, что вместе с подводкой тока может оказаться менее выгодным, нежели установка возбуждателя. При различных нагрузках синхронизированный асинхронный двигатель ведет себя совершенно так же, как синхронный с добавочной пусковой обмоткой, т. е. при перегрузке выпадает из фазы и, не останавливаясь, переходит на асинхронный режим. Выпадение из синхронизма нормального асинхронного двигателя наступает гораздо скорее, чем у синхронного, а именно уже при 25% перегрузки. Причина менее устойчивой работы заключается в том, что для получения хороших пусковых характеристик асинхронные двигатели изготавливаются с междужелезным пространством, значительно меньшим, нежели синхронные, а последнее обстоятельство, как известно, отзывается отрицательно на величине максимального момента, т. е. перегрузочной способности.

Чтобы сделать работу двигателя устойчивой, необходимо повысить его синхронный опрокидывающий момент, что на практике достигается увеличением междужелезного пространства синхронизированных двигателей, правда, за счет уменьшения пускового момента. Опрокидывающий момент доходит до 1,5 нормального, после чего работа двигателя характеризуется понижением числа оборотов, увеличением силы тока и резким уменьшением коэффициента мощности, который вследствие увеличенного междужелезного пространства вообще ниже, чем у нормального асинхронного двигателя. Возникающие после выпадения из синхронизма колебания силы тока являются небезопасными для двигателя и сети, поэтому оставлять двигатель работать на асинхронном режиме не следует.

В отношении улучшения $\cos \varphi$ всей установки синхронизированный асинхронный двигатель так же удобен, как и синхронный. Путем значительного перевозбуждения можно заставить двигатель работать с опережающим коэффициентом мощности, повышая одновременно и его перегрузочную способность, но при этом должна быть понижена его полезная мощность. В табл. 180 приведены соответствующие данные для синхронизированных асинхронных двигателей завода Броун-Бовери.

ТАБЛИЦА 180.

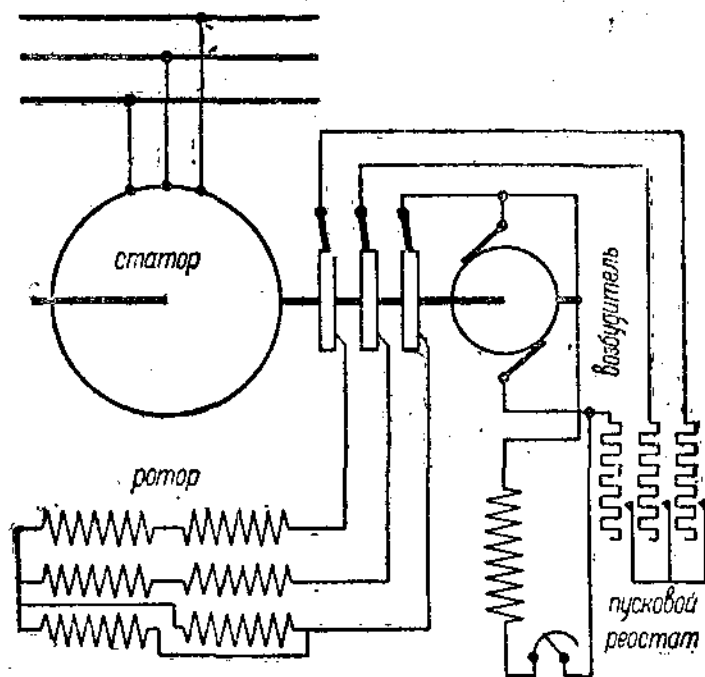
Опережающий $\cos \varphi$	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
Уменьшение мощности против работы при $\cos \varphi = 1$. . .	10%	22%	31%	38%	45%	50%	60%	69%	78%	86%

Наряду с уменьшением полезной мощности падает и коэффициент полезного действия, как видно из табл. 181, для тех же двигателей Броун-Бовери.

ТАБЛИЦА 181.

$\cos \varphi = 1$		Опережающий $\cos \varphi$					
		0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
К. п. д.	95	94	92,5	91	89	86	84,5
	94	93	91,5	89,5	87	84	80,5
	93	91,5	90	87,5	85	81,5	77
	92	90,3	88,5	86	83	79	74
	91	89,2	87	84,5	81,5	77	71
	90	88,0	85,5	83	80	75	68
	89	86,5	84	81	77,5	73,5	64

Синхронизация асинхронных двигателей по способу Даниельсона чрезвычайно проста, однако обмотка ротора не вполне используется. Как видно из схемы фиг. 524, сила тока в одной из фаз вдвое больше, чем в двух других; потоки их будут также различны,



Фиг. 525.

тогда как при работе на асинхронном режиме эффективные значения токов равны. Как следствие этого, синхронизированный двигатель не в состоянии развить такую мощность, как асинхронный, если она не будет достигаться за счет перегрузки одной из фаз ротора. Полное использование обмотки ротора при питании его

постоянным током будет иметь место в случае двухфазной обмотки, так как сила тока в обеих фазах будет одинаковая. Однако при этом отдача асинхронного двигателя будет понижена, ибо при двухфазном роторе меньше использован активный материал — железо. Чтобы избежать недостатков схемы Даниельсона, Гёффлер предложил разделить обмотку той фазы, по которой протекает двойной ток, на две параллельных ветви (фиг. 525). Возникающая отсюда несимметричность при пуске асинхронного двигателя практического значения не имеет. Пуск производится, как нормального асинхронного двигателя, последовательным выключением ступеней реостата.

Как уже говорилось выше, синхронизированный асинхронный двигатель работает с постоянным коэффициентом мощности только при постоянной нагрузке. Чтобы достичь его работы с постоянным $\cos \varphi$ при всякой нагрузке, необходимо соответственно ей изменять силу тока возбуждения. Повышение напряжения при увеличении нагрузки делает работу двигателя более устойчивой. Само собой разумеется, что следить за нагрузкой и приводить в действие реостат возбуждения возбудителя от руки невозможно, и для этого предложен специальный автоматический регулятор напряжения. При малых нагрузках последний, уменьшая возбуждение, уменьшает одновременно и потери в двигателе и повышает к. п. д. Принцип устройства автомата подобен принципу системы Тириль, Броун-Бовери и пр. для автоматической регулировки напряжения генераторов.

Благодаря такому автомату является возможность в установках с сильно колеблющейся нагрузкой применять двигатели меньшей мощности. Следовательно автомат выгоден в двух случаях:

- 1) при сильно колеблющейся нагрузке и
- 2) при продолжительной недогрузке.

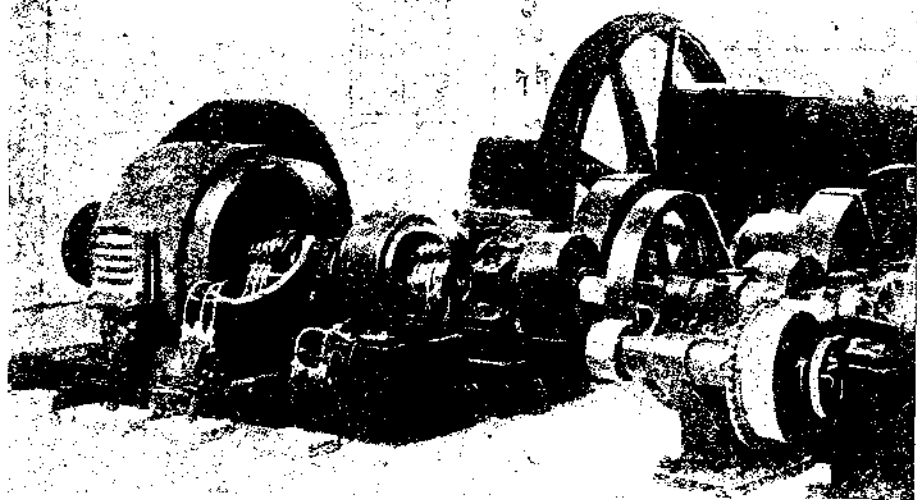
В последнем случае приходится считаться с уменьшением к. п. д. двигателя (см. табл. 182).

ТАБЛИЦА 182.

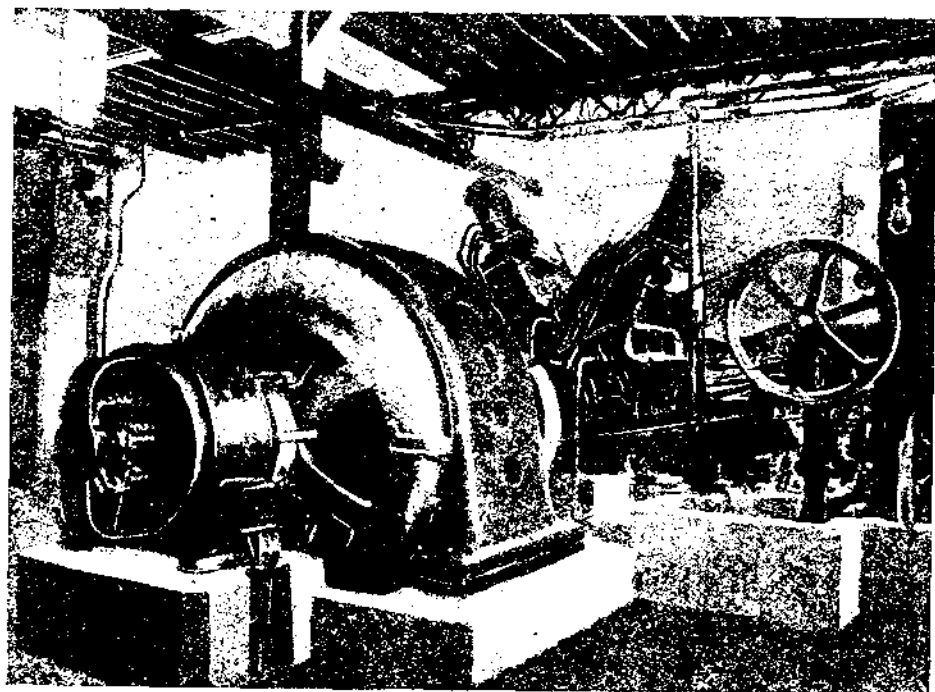
К.п.д. $\frac{1}{4}$ нагрузки	95	94	93	92	91	90	89
К.п.д. $\frac{2}{3}$ нагрузки	94	93	91,5	90	88,5	87,5	86
К.п.д. $\frac{1}{2}$ нагрузки	91	89,5	87,5	86	84,5	83	81
К.п.д. $\frac{1}{4}$ нагрузки	84,5	82	79	76,5	73,5	71	68

На фиг. 526 изображен синхронизированный асинхронный двигатель для привода небольшого прокатного стана для фольги. Благодаря регулятору двигатель совершенно свободно переносит короткие пики нагрузки, сохраняя постоянный коэффициент мощности.

На фиг. 527 показана установка двигателя той же системы мощностью 450 kW 250 об/мин для привода дефибрера.



Фиг. 526.



Фиг. 527.

Из всего вышесказанного следует, что синхронизированные асинхронные двигатели должны применяться в установках с низким коэффициентом главным образом для приводов, которые характеризуются постоянством скорости и безударной нагрузкой.

В приводах реверсивных и требующих регулирования числа оборотов синхронизированные двигатели, так же как и синхронные, неприменимы.

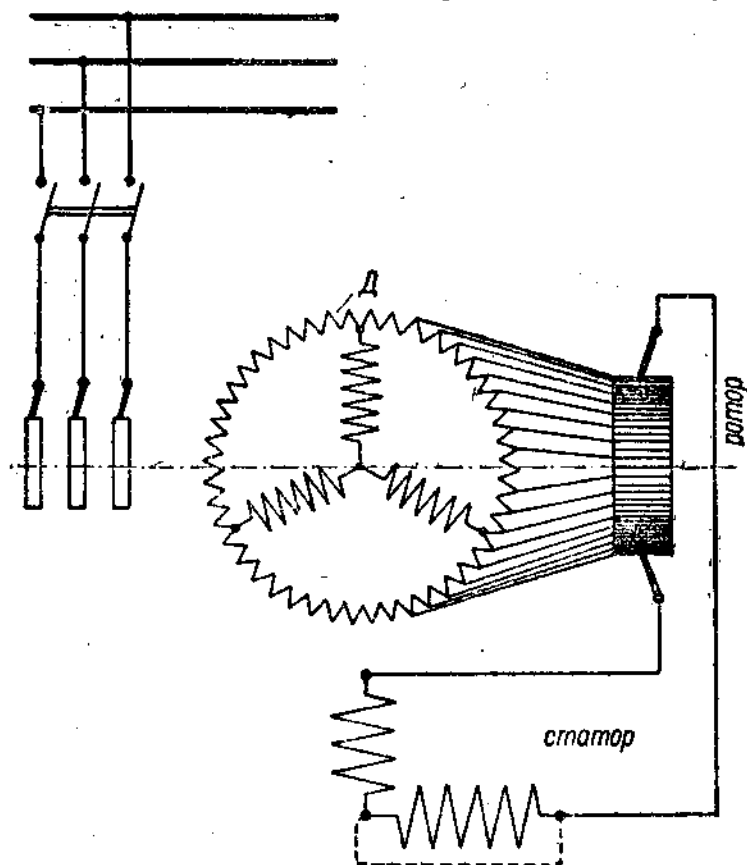
В табл. 183 даны стоимости синхронизированных асинхронных двигателей типа WMS завода Броун-Бовери с учетом накладных расходов на импортное оборудование. Цены показывают безусловное преимущество синхронных двигателей.

ТАБЛИЦА 183.

Тип WMS	Число об./мин	Мощность в kW	К. п. д. %	Вес двигателя, в kg	Стоимость в руб.	Возбудитель					Полная стоимость двиг. с возб. (руб.)
						Мощность kW	Напряжение V	Сила тока A	Вес в kg	Стоимость в руб.	
166-а . . .	1000	42	91,5	650	2470	1,7	7,5	230	200	1090	3 560
166		50	92	700	2560	2,0	8,5	230	200	1090	3 560
186-а . . .		62	92	880	2830	2,4	7,5	320	200	1090	3 920
186		78	92	920	3200	2,8	8,5	320	200	1090	4 290
206-и . . .		118	92	1300	3680	3,9	13,0	300	200	1090	4 770
226-и . . .		185	92,5	1800	5450	5,3	14,0	380	265	1400	6 850
246-и . . .	1000	300	93	2500	6450	7,0	15,5	450	265	1400	7 850
266		375	93,5	3000	7670	7,9	15,5	500	540	2440	10 110
168-и . . .	750	27	87	690	3800	1,5	5,5	200	200	1090	4 890
188-и . . .		40	89	900	3940	1,8	6,0	310	200	1090	5 030
188-м . . .		50	89,5	980	4150	2,3	7,5	310	200	1090	5 240
208-х . . .		70	90	1250	4500	2,8	9,5	300	200	1090	5 590
228-х . . .		110	91,5	1500	5160	4,0	11,0	360	265	1400	6 560
248-и . . .		195	91,5	2400	7390	5,7	13,0	430	265	1400	8 790
248	750	210	92	2400	7960	5,8	13,5	430	265	1400	9 360
268		260	92,5	2910	8750	6,4	14,0	460	540	2490	11 190
1810-х . .	600	30	85,5	875	4180	1,8	7,5	240	200	1090	5 270
2010-х . .		40	88,0	1165	4600	2,4	8,5	275	200	1090	5 690
2210-и . .		52	88,5	1175	4960	2,5	9,0	275	200	1030	6 050
2210-х . .		85	90	1375	5540	3,6	11,0	325	265	1400	6 940
2410-и . .		150	91	2150	7370	4,8	12,5	385	540	2440	9 810
2610 . . .		190	91,5	2660	8750	5,6	14,0	400	540	2440	11 190
2012-и . .	500	40	86	1150	5270	2,7	9,5	280	265	1400	6 670
2212-х . .		50	88	1335	5640	3,0	11,0	270	265	1400	7 040
2212-и . .		65	89	1355	6240	3,4	12,5	270	265	1400	7 640
2412-и . .		110	90,5	2150	7400	5,0	14,5	340	540	2440	9 840
2412 . . .		125	90,5	2150	7950	5,3	15,5	340	540	2440	10 390
2612 . . .		150	91	2660	8750	6,0	17,5	340	540	2440	11 190

Особенно высока стоимость синхронизированных двигателей малой мощности, что объясняется наличием отдельного возбuditеля. Снижение ее может быть достигнуто превращением двигателя в самовозбуждающийся путем соединения возбuditеля и двигателя в одной машине. Решение этой задачи было предложено инж. Шюлером и выполнено фирмой Макс Леви для мощностей от 3 до 75 kW (так называемый тип Synasyn).

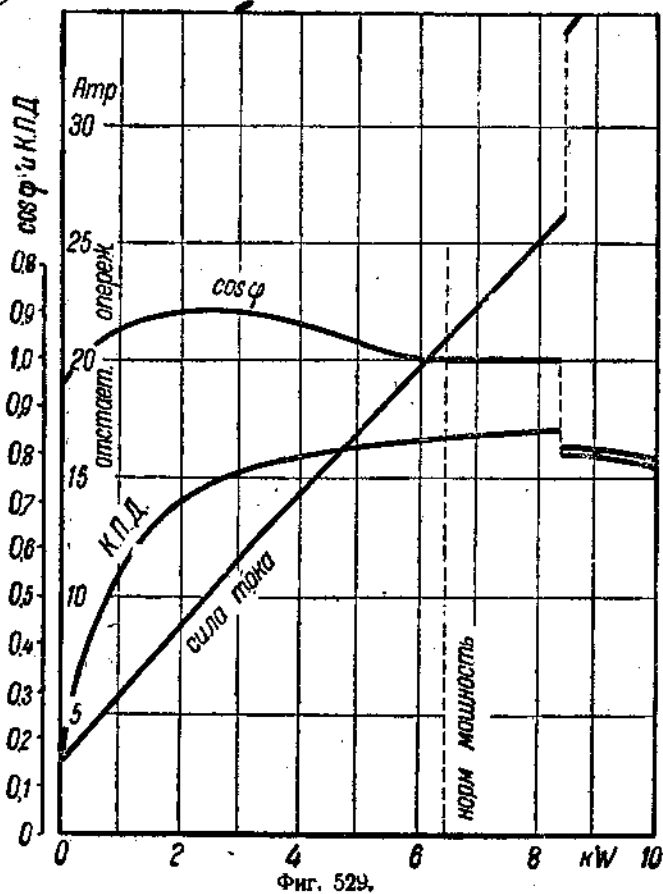
Роли статора и ротора в этих двигателях взаимно переменены. Подключение двигателя к сети происходит со стороны ротора через три контактных кольца. Обмотка статора, выполненная двухфазной,



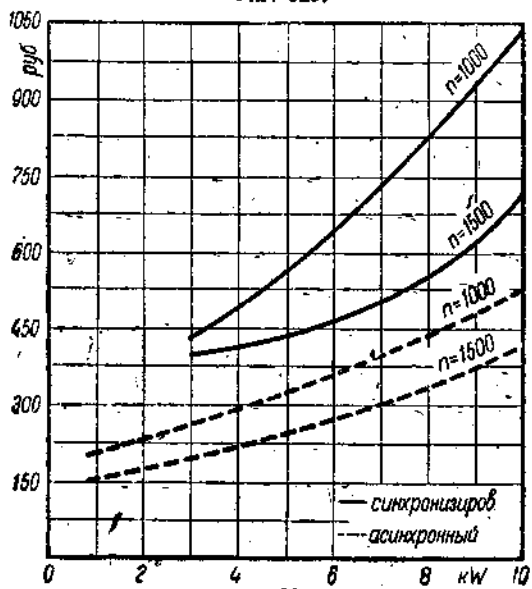
Фиг. 528.

соединяется с пусковым реостатом. На роторе заложена добавочная обмотка Д, с небольшим числом витков, выведенная к коллектору (фиг. 528). Назначение этой обмотки создавать постоянный ток возбуждения, который при помощи пары щеток подводится к обмотке статора.

Напряжение на щетках поддерживается около 25 V, что обеспечивает безыскровое коммутирование. Вследствие малого числа витков электродвижущая сила самоиндукции также невелика. По данным Шюлера искрения не наблюдается при наиболее тяжелых условиях работы, т. е. в момент пуска и при перегрузке.



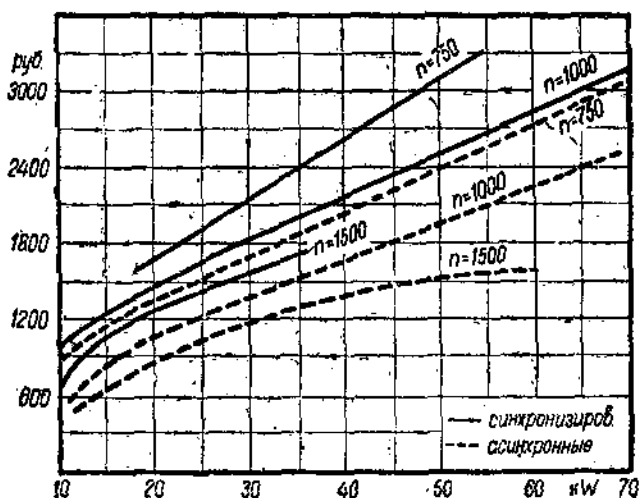
Фиг. 529.



Фиг. 530 а.

— Пуск двигателя производится аналогично асинхронному через пусковой реостат. Схема составлена так, что после выключения сопротивления автоматически включается в статор постоянный ток и двигатель входит в синхронизм. Так как двигатель работает при нагрузке как синхронный, то при перегрузках, примерно около 30%, он выпадает из фазы и, подобно синхронизированному с независимым возбуждением, продолжает работать как асинхронный, но в отличие от последнего при уменьшении нагрузки сам входит в синхронизм. Колебания тока после выпадения из синхронизма меньше, чем в двигателе с независимым возбуждением, что допускает работу в течение короткого времени на асинхронном режиме без вреда для машины.

Выпадение из синхронизма характеризуется уменьшением числа оборотов и $\cos \phi$ при увеличении силы тока. Характеристики двигателя Шюлера 6,5 kW, 1500 об/мин, 220 V приведены на фиг. 529.



Фиг. 530 б.

В табл. 184 приведены стоимости синхронизированных двигателей с самовозбуждением завода Макс Леви, а на фиг. 530 а и 530 б кривые сравнительной стоимости этих двигателей и нормальных асинхронных с фазным ротором (без реостата, щкива и салазок).

Разница в цене составляет в среднем около 80% для мелких двигателей и около 30% для крупных от 25 kW и выше.

Практика эксплуатации синхронизированных асинхронных двигателей показала пригодность только крупных двигателей с независимым возбуждением и то при работе на ровную нагрузку. Что касается двигателей с самовозбуждением, то даваемая ими выгода по $\cos \phi$ далеко не окупает расходов по обслуживанию. По личным наблюдениям автора производство мелких самовозбуждающихся двигателей на заводе Макс Леви замирает, в отношении же крупных

приходится констатировать постепенное вытеснение их синхронными двигателями.

ТАБЛИЦА 184.

Мощность kW	Число об/мин	Цена без салазок, реостата и шкива руб.	Мощность kW	Число об/мин	Цена без салазок, реостата и шкива руб.
3	1500	435	7	1000	790
4		440	10		1 100
5		452	13		1 250
6		470	18		1 420
7,5		540	23		1 580
10		750	30		1 900
13		1 020	50		2 500
20		1 290	75		3 500
26		1 440			
3	1000	455	18	750	1 630
3,6		500	24		2 000
4,5		565	37		2 500
			55		3 500

§ 9. Фазокомпенсаторы.

Как показывает выражение

$$P_{\text{в1}} = \frac{1}{4} \cdot B^2 f q \delta, \quad (339)$$

величина безваттной мощности, необходимой для создания потока, пропорциональна частоте тока. Это обстоятельство позволяет понизить потребляемую асинхронным двигателем безваттную отстающую мощность, если питать его безваттным током со стороны ротора, где частота, завися от скольжения, нормально очень мала. Безваттная мощность, идущая на создание магнитного потока трехфазного двигателя со стороны статора $P_{\text{в1}} = \sqrt{3} \cdot E_1 I_1 \sin \varphi$ пропорциональна в нормальных условиях электродвижущей силе первичной цепи двигателя.

У двигателя с равным числом витков статора и ротора электродвижущая сила, индуцируемая во вторичной цепи, равна

$$E_2 = E_1 \sigma,$$

где σ — скольжение асинхронного двигателя.

Безваттная мощность, необходимая для создания того же потока при питании со стороны ротора, будет

$$P_{\text{в2}} = \sqrt{3} E_1 \sigma I_1 \sin \varphi$$

Таким образом

$$\frac{P_{\text{в1}}}{P_{\text{в2}}} = \frac{1}{\sigma},$$

а так как

$$f_2 = \sigma f_1,$$

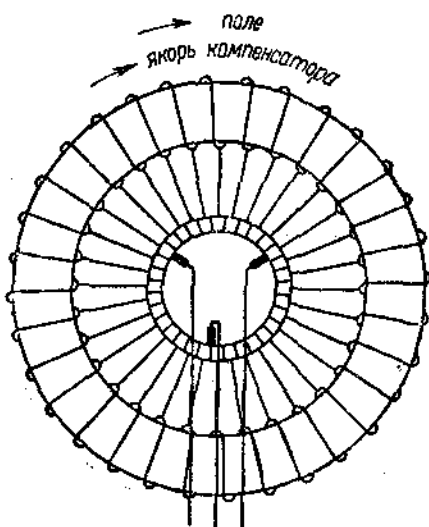
то $P_{\text{в}2}$ будет во столько раз меньше $P_{\text{в}1}$, во сколько частота ротора меньше частоты статора.

Машины, доставляющие безваттную мощность в ротор двигателя, носят название фазокомпенсаторов. Существуют три рода фазокомпенсаторов:

1) вращаемые с самовозбуждением (например тип DAD завода AEG, тип PC завода BBC и тип ФК завода „Электросила“,

2) вращаемые с независимым возбуждением (тип RAD завода AEG) и

3) вибрирующие. (Вибратор Каппа, не получивший практического применения и поэтому здесь не рассматриваемый.)



Фиг. 531.

1) Компенсаторы, вращаемые, с возбуждением. К самовозбуждающимся компенсаторам относятся машины следующих типов: безстаторный компенсатор Леблана-Шербиуса, компенсатор с последовательным возбуждением Уокера, компенсатор с параллельным возбуждением Шербиуса и компенсатор со смешанным возбуждением Зейца.

Компенсатор Леблана-Шербиуса. Компенсатор Леблана (фиг. 531) представляет собой коллекторный ротор, несущий обмотку постоянного тока. Статор этого компенсатора не имеет обмотки и служит исключительно проводником магнитного поля ротора. На коллекторе ротора компенсатора устанавливаются симметрично три щетки, которые соединяются со

щетками контактных колец ротора компенсируемого асинхронного двигателя.

В конструкцию компенсатора Леблана Шербиусом были внесены изменения, позволившие устранить статор и заменить его простым кожухом для предохранения ротора от механических повреждений и пыли. Такого рода упрощения достигаются тем, что обмотка ротора закладывается не у периферии последнего, а на некотором расстоянии от нее в особые аксиальные каналы, находящиеся внутри тела ротора. Благодаря этому магнитные силовые линии получают возможность замыкаться, не выходя за пределы ротора, чем и устраняется необходимость в статоре, как проводнике этих силовых линий.

В настоящее время компенсатор Леблана применяется исключительно в той форме, которая была придана ему Шербиусом.

Если к щеткам коллектора компенсатора Леблана-Шербиуса подвести трехфазное напряжение некоторой частоты f_2 , то по коллектору начнет

перемещаться потенциальная волна, скорость которой относительно неподвижных щеток $\omega_2 = 2\pi f_2$ не зависит от того, вращается ли ротор или нет. Если ротор привести во вращение в сторону вращения потенциальной волны со скоростью ω_3 , то скорость перемещения потенциальной волны относительно пластин коллектора станет равной $\omega_4 = \omega_2 - \omega_3 = \sigma_2 \cdot \omega_2$, где $\sigma_2 = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_2}$ — скольжение ротора компенсатора; скорость же потенциальной

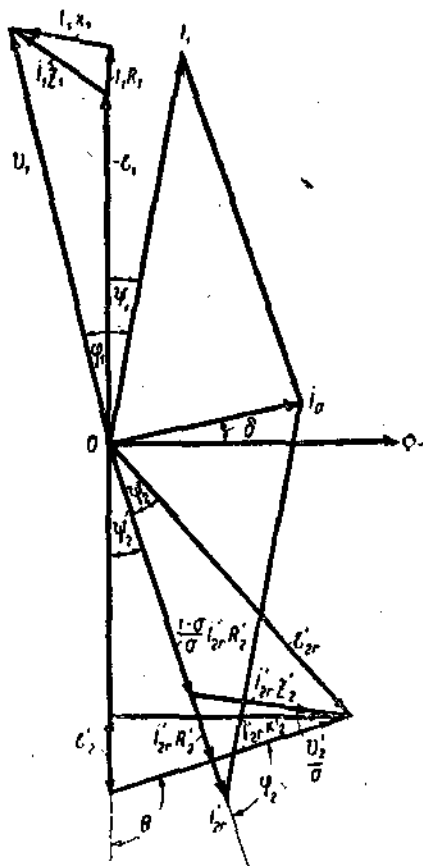
волны относительно неподвижных щеток попрежнему остается равной ω_2 . Под влиянием напряжения, подведенного к коллектору, в обмотках компенсатора установится трехфазный ток, частота которого будет равна частоте перемещения потенциальной волны относительно коллекторных пластин, а следовательно и проводов обмотки ротора, т. е. $f_2 \sigma_2 = f_3$. Этот ток создает совпадающий с ним по фазе магнитный поток, который будет вращаться относительно проводов обмотки ротора со скоростью $2\pi f_3 = 2\pi f_2 \sigma_2 = \omega_2 \sigma_2 = \omega_4$, а так как провода обмотки вместе с ротором вращаются со скоростью ω_3 , то абсолютная скорость вращения магнитного потока относительно неподвижного пространства будет равна $\omega_4 + \omega_3 = \omega_2$. Вращающееся магнитное поле, пересекая провода обмотки ротора, будет индуцировать в каждой фазе последнего э.д. силы, численно равные

$$E_k = 4 \cdot k_k \cdot \omega_k f_3 \Phi_k \cdot 10^{-8} = \\ = 4 \cdot k_k \cdot \omega_k f_2 \sigma_2 \Phi_k \cdot 10^{-8} \text{ В,}$$

где k_k , ω_k и Φ_k — соответственно представляют коэффициент э.д. силы, число последовательно соединенных витков одной фазы и магнитный поток компенсатора.

Эта э.д. сила, имеющая частоту $f_3 = \sigma_2 f_2$, будет отставать по фазе от магнитного потока Φ_k , а следовательно и от совпадающего с ним тока, на угол в 90° . Совместно с ваттным и безваттным падениями напряжения в обмотках ротора компенсатора эта э.д. сила уравновесит приложенное к коллектору напряжение V_2 , имеющее частоту, по абсолютному значению равную f_2 , но относительно коллекторных пластин, а следовательно и проводов обмотки ротора, равную $f_2 \sigma_2 = f_3$, т. е. равную частоте э.д. силы E_k .

Если $\omega_3 > \omega_2$, то $\sigma_2 < 0$, и э.д. сила E_k изменяет знак на обратный, т. е. если при $\sigma_2 > 0$ она отставала от Φ_k и I_2 на 90 эл. градусов, то при $\sigma_2 < 0$ она будет опережать Φ_k и I_2 на такой же угол.



Фиг. 532.

На фиг. 532 представлена векторная диаграмма асинхронного двигателя, работающего в каскадном соединении с компенсатором при условии $\sigma_2 < 0$, т. е. когда напряжение компенсатора V_2' опережает ток I_{2r}' на 90° .

При каскадном соединении компенсатора с асинхронным двигателем частота $f_2 = \sigma f_1$, где f_1 — частота напряжения сети, а σ — скольжение асинхронного двигателя; при этом:

$$V_2' \cong E_k' = u_e \cdot 4 \cdot k_k \cdot \omega_k \cdot f_1 \cdot \sigma \cdot \Phi_k \cdot 10^{-8} \text{ В},$$

где $u_e = \frac{k_1 \omega_1}{k_2 \omega_2}$ — коэффициент трансформации э.д. сил статора и ротора асинхронного двигателя; падениями напряжения в компенсаторе пренебрегаем и считаем $V_2' \cong E_k'$.

Так как магнитный поток статора в компенсаторе отсутствует, то вращающий момент последнего можно принять равным нулю. Поэтому компенсатор приводится во вращение либо компенсируемым, либо вспомогательным двигателем. Второй способ удобнее, так как позволяет территориально отделить компенсатор от главного двигателя.

В виду того, что магнитный поток Φ_k компенсатора создается проходящим по его обмоткам током I_{2r}' , в выражении $\Phi_k = \beta I_{2r}'$ можно считать коэффициент пропорциональности β численно постоянным при незначительном насыщении железа.

Таким образом получаем:

$$V_2' \cong E_k' = 4 \cdot u_e \cdot k_k \omega_k f_1 \beta \sigma_2 I_{2r}' \cdot 10^{-8} \text{ В}.$$

Если компенсатор приводится во вращение вспомогательным посторонним двигателем, то $\omega_3 = \text{const}$ и

$$\sigma_2 = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_2} = \frac{2\pi f_1 \sigma - \omega_3}{2\pi f_1 \sigma} = \frac{\omega_1 \sigma - \omega_3}{\omega_1 \sigma},$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1 = \text{const}$ — некоторая фиктивная угловая скорость.

Если же компенсатор вращается компенсируемым двигателем, то $\omega_3 = (1 - \sigma)\omega_{03}$, где ω_{03} при $\sigma = 0$ равна ω_3 , и является некоторой постоянной величиной, зависящей от численного значения передаточного коэффициента передачи, установленной между валами двигателя и компенсатора; при этом:

$$\sigma_2 = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_2} = \frac{\omega_1 \cdot \sigma - \omega_{03}(1 - \sigma)}{\omega_1 \cdot \sigma} = \frac{(\omega_1 - \omega_{03})\sigma - \omega_{03}}{\omega_1 \cdot \sigma}.$$

В том и другом случае σ_2 есть функция σ .

При каскадном соединении асинхронного двигателя с компенсатором угол $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$; в виду этого:

$$\varphi_2' = \theta - \frac{\pi}{2}.$$

Следовательно, в рассматриваемом случае будет иметь место соотношение:

$$I_{2r}' = \frac{R_2'}{\sigma} = E_2' \cos \varphi_2' = E_2' \sin \theta$$

или

$$I_{2r}' = \frac{\sigma E_2' \sin \theta}{R_2'} \quad (353)$$

Таким образом выражение э.-д. силы E_k принимает вид:

$$\begin{aligned} V_2' \cong E_k' &= \frac{2 \cdot u_k \cdot k_k \cdot w_k \cdot E_2'}{\pi R_2' 10^8} \beta \sin \theta (\omega_1 \sigma - \omega_3) \tau = \\ &= \frac{2 \cdot u_k K_k W_k E_2'}{\pi R_2' 10^8} \beta \sin \theta [(\omega_1 + \omega_{03}) \sigma - \omega_{03}] \sigma. \end{aligned} \quad (354)$$

Согласно общей формуле каскадных соединений:

$$I_{2r}' = \frac{\sigma^2 E_2'^2 + V_2'^2 + 2 \sigma E_2' V_2' \cos \theta}{R_2' + \sigma^2 X_2'^2}$$

Принимая во внимание уравнение (353), находим:

$$I_{2r}' = \frac{V_2' + \sigma E_2' \cos \theta}{\sigma X_2'} \quad (353')$$

Сравнивая уравнения (353) и (353'), получаем:

$$V_2' = \sigma E_2' \left(\frac{\sigma X_2'}{R_2'} \sin \theta - \cos \theta \right) \quad (355)$$

или

$$V_2' = - \frac{\sigma E_2'}{\cos \psi_2} \cos (\theta + \psi_2) = - \frac{\sigma E_2'}{R_2'} \sqrt{R_2'^2 + \sigma^2 X_2'^2} \cos (\theta + \psi_2). \quad (355')$$

В системах каскадных соединений, рассмотренных в отделе регулирования, угол θ мог быть изменяем независимо от численного значения V_2' путем сдвига щеток по коллектору вторичной машины или путем надлежащего возбуждения последней. В данном же случае компенсатора Леблана-Шербиуса угол θ является, как легко видеть из уравнений (355) и (355'), функцией V_2' , поэтому уравнение (354) нельзя рассматривать как явную зависимость V_2' от скольжения σ , так как входящий в них параметр θ в свою очередь является функцией V_2' , а следовательно и скольжения.

Чтобы получить зависимость V_2' от σ в явной форме, необходимо исключить θ из системы уравнений (354) и (355); однако легко предугадать, что полученная таким образом зависимость V_2' от σ будет слишком сложного вида, непригодного для практического применения.

В качестве первого, грубого приближения можно пренебречь безваттным падением напряжения в обмотке ротора асинхронного двигателя и принять согласно уравнению (355) и диаграмме фиг. 532:

$$V_2' \cong - \sigma E_2' \cos \theta, \quad (356)$$

откуда

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{\sigma^2 E_2'^2 - V_2'^2}}{\sigma E_2'} \quad (356')$$

Подставляя в уравнение (354), получим:

$$V_2' \cong \frac{4u_c k_k w_k f_1 \beta}{R_2' \cdot 10^8} (\sigma - c) \sqrt{\sigma^2 E_2'^2 - V_2'^2},$$

где $c = \frac{\omega_3}{\omega_2} = \text{const}$ при условии $\omega_3 = \text{const}$ *)

или

$$V_2' \cong \rho_k \cdot (\sigma - c) \cdot \sqrt{\sigma^2 E_2'^2 - V_2'^2},$$

причем

$$\rho_k = \frac{4u_c k_k w_k f_1 \beta}{R_2' \cdot 10^8} \cong \text{const.}$$

Из последнего уравнения находим:

$$V_2' = \frac{\rho_k E_2' \sigma (\sigma - c)}{\sqrt{1 + \rho_k^2 (\sigma - c)^2}}.$$

Численное значение величины $\rho_k^2 (\sigma - c)^2$, стоящей под знаком радикала, ничтожно мало по сравнению с единицей при всех допускаемых практически скольжениях, а потому ею можно пренебречь и считать:

$$V_2' = \rho_k \cdot E_2' \cdot \sigma (\sigma - c). \quad (357)$$

При этом всегда должно иметь место неравенство $\sigma < c$, так как в противном случае окажется $\omega_1 = \omega_2 > \omega_3$, и напряжение V_2' , изменив знак, станет из опережающего ток I_{2r}' отстающим от него. Наличие компенсатора в цепи ротора асинхронного двигателя в этих условиях будет равносильно индуктивному сопротивлению, которое вызовет уменьшение опрокидывающего момента и коэффициента мощности.

Итак, уравнение (357) может быть рассматриваемо как основное уравнение компенсатора Леблана-Шербиуса, дающее зависимость V_2' от E_2' и от скольжения σ при условии $\Phi_k = \beta I_{2r}'$, имеющем место лишь при ничтожно малом насыщении железа компенсатора.

Практически же компенсатор выполняется с сильно насыщенной магнитной цепью, что дает возможность получить значительной величины поток Φ_k , а следовательно и V_2' уже при небольших значениях тока I_{2r}' и нагрузки компенсируемого двигателя. При дальнейшем увеличении нагрузки и тока I_{2r}' величина V_2' может увеличиваться исключительно за счет увеличения скольжения σ асинхронного двигателя, т. е. э.д. силы ротора $\sigma \cdot E_2'$, но не за счет увеличения тока возбуждения I_{2r}' и магнитного потока Φ_k , который, как сказано, достигает своей полной, номинальной величины уже при небольших значениях тока I_{2r}' . Благодаря этому получается значительный компенсирующий эффект при малых нагрузках. Однако из уравнения (357) легко видеть, что при увеличении скольжения σ напряжение V_2' , а следовательно и компенсирующий эффект, воз-

*) Случай вращения компенсатора от компенсируемого двигателя, когда $\omega_3 = (1 - \sigma)\omega_{об}$, рассматривать не будем, как случай, на практике не получивший распространения.

растет не беспречно: дифференцируя V_2' по σ и приравнявая производную нулю, получаем уравнение:

$$\frac{dV_2'}{d\sigma} = \rho_k \cdot E_2'(\sigma + \sigma - c) = 0,$$

откуда легко определить значение σ , при котором V_2' достигает максимума

$$\sigma_{\max} = \frac{c}{2}.$$

Следовательно

$$V_2'(\max) = -\rho_k E_2' \frac{c^2}{4},$$

при этом по уравнению (356):

$$\Theta_{\max} = \arccos \frac{\rho_k \cdot c}{2}.$$

При увеличении скольжения σ свыше $\frac{c}{2}$ численное значение V_2' и компенсирующий эффект начинают убывать. Так как при этом с возрастанием тока I_2' и насыщения железа ротора двигателя потоки рассеяния возрастают, то скоро наступает такой момент, когда с возрастанием $\psi_2 = \arctg \frac{\sigma X_2'}{R_2'}$ ток I_2' из опережающего оказывается отстающим от E_2' . При этом угол Θ из тупого превращается в острый. Если при малых нагрузках, когда $\Theta > \frac{\pi}{2}$, V_2' имеет составляющую, направленную навстречу E_2' , и, следовательно, вызывает увеличение скольжения σ , то при значительных нагрузках, когда $\Theta < \frac{\pi}{2}$, V_2' получает составляющую по направлению E_2' , вследствие чего скольжение уменьшается.

Таким образом перенасыщенный компенсатор делает характеристику асинхронного двигателя непригодной для работы на ударную нагрузку с маховиком.

Компенсатор Леблана-Шербиуса с малым насыщением не дает сколь угодно заметного компенсирующего эффекта при малых нагрузках, когда коэффициент мощности асинхронного двигателя особенно низок и требует компенсации, тогда как компенсатор с большим насыщением делает механическую характеристику компенсируемого двигателя недопустимо жесткой.

Для случая сильно насыщенного компенсатора можно принять Φ_k не зависящим от тока I_2' , и тогда согласно уравнению:

$$V_2' \cong 4 u_e k_k w_k f_1 \Phi_k \sigma_2 \sigma 10^{-8}$$

получаем вместо (357) следующее уравнение:

$$V_2' = \frac{4 u_e k_k w_k f_1 \Phi_k}{10^8} (\sigma - c)$$

или

$$V_2' = \rho_k' E_2' (\sigma - c), \quad (358)$$

где

$$\rho_k' = \frac{4u_e \omega_k k_k f_1 \Phi_k}{E_2' \cdot 10^9} = \text{const.}$$

В общем случае каскадного соединения асинхронного двигателя вращающийся момент:

$$M = \frac{m_1 E_2'}{\omega_0} \cdot \frac{R_2' \sigma E_2' + R_2' V_2' \cos \Theta + \sigma X_2' V_2' \sin \Theta}{R_2'^2 + \sigma^2 X_2'^2}.$$

Подставляя сюда вместо V_2' его значение из уравнения (357) и вместо $\cos \Theta$ и $\sin \Theta$ соответственно:

$$\cos \Theta = -\frac{V_2'}{E_2' \sigma} = -\rho_k (\sigma - c)$$

и

$$\sin \Theta = \sqrt{1 - \rho_k^2 (\sigma - c)^2}.$$

получим:

$$M = \frac{m_1 \sigma E_2'^2 \sqrt{1 - \rho_k^2 (\sigma - c)^2}}{\omega_0 (R_2'^2 + \sigma^2 X_2'^2)} \left[R_2' \sqrt{1 - \rho_k^2 (\sigma - c)^2} + \sigma k_2' \rho_k (\sigma - c) \right]$$

или

$$M = \frac{m_1 \sigma E_2'^2 \sin \Theta}{\omega_0 \sqrt{R_2'^2 + \sigma^2 X_2'^2}} \sin (\Theta + \psi_2). \quad (359)$$

Отсюда следует, что M обращается в нуль при $\sigma = 0$, а также при $\Theta = 0$, когда I_2' (всегда нормальный к направлению V_2') отстает от E_2' по фазе на 90° , и, наконец, при $\sin (\Theta + \psi_2) = 0$, что равносильно условию $180^\circ = \Theta + \psi_2$, при котором составляющая V_2' на E_2' оказывается равной, но прямо-противоположной э.д. силе ротора асинхронного двигателя.

Дифференцируя M по Θ в предположении $\sigma = \text{const}$ и приравнявая производную нулю, определим значение Θ , при котором M достигает максимума для заданного значения σ :

$$\frac{dM}{d\Theta} = \frac{m_1 \sigma E_2'^2}{\omega_0 \sqrt{R_2'^2 + \sigma^2 X_2'^2}} \left[\sin \Theta \cos (\Theta + \psi_2) + \cos \Theta \sin (\Theta + \psi_2) \right] = 0,$$

откуда

$$\sin (2\Theta + \psi_2) = 0$$

или

$$\sin [180 - (2\Theta + \psi_2)] = 0,$$

или

$$\Theta_{\max} = \frac{180 - \psi_2}{2} = 90 - \frac{\psi_2}{2}; \quad (360)$$

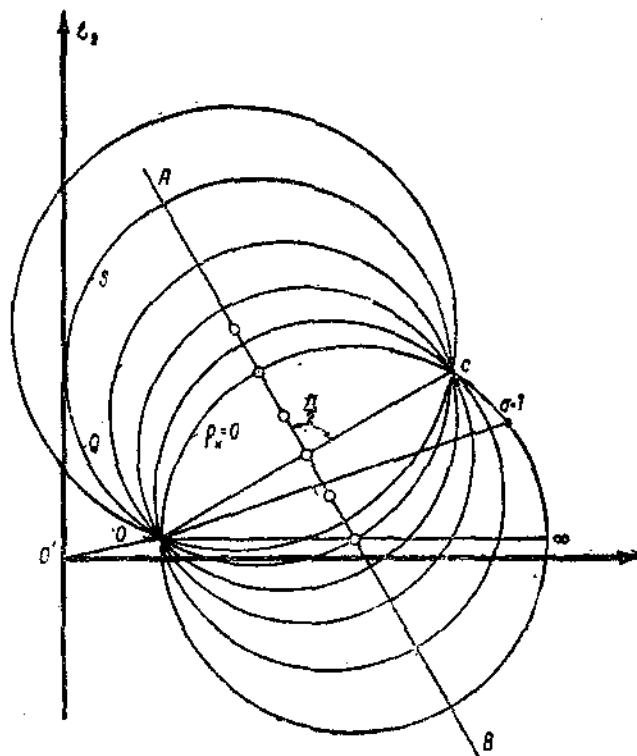
подставляя в уравнение (359), найдем:

$$M_{\max} = \frac{m_1 \sigma E_2'^2}{\omega_0 \sqrt{R_2'^2 + \sigma^2 X_2'^2}} \cos^2 \frac{\psi_2}{2}$$

или

$$M_{\max} = \frac{m_1 a E_2'^2}{2\omega_0 (R_2'^2 + \sigma^2 X_2'^2)} (R_2' + \sqrt{R_2'^2 + \sigma^2 X_2'^2}) \quad (361)$$

Так как при $V_2' = 0$ ротор компенсируемого двигателя оказывается короткозамкнутым, то окружности токов каскада двигателя и компенсатора, построенные для различных значений p_k , должны пересечься с окружностью токов короткозамкнутого двигателя в точках, отвечающих значениям скольжения, при которых $V_2' = 0$. Такими значениями скольжения в рассматриваемом случае согласно уравнению (357) являются: $\sigma = 0$ (ротор компенси-



Фиг. 533.

руемого двигателя вращается синхронно с полем его статора) и $\sigma = c$ (ротор компенсатора вращается синхронно со своим магнитным полем).

На фиг. 533 представлены системы окружностей токов, *) отвечающих различным значениям p_k , из которых следует, что при надлежащем значении p_k возможна работа асинхронного двигателя с опережающим током. Легко видеть, что вблизи полной компенсации (участок QS) коэффициент

*) Подробную теоретическую разработку вопроса о круговых диаграммах асинхронного двигателя с фазокомпенсатором можно найти в книге Н. F. Schell, *Kompensierte und synchronisierte Asynchronmotoren*, Verl. J. Springer, 1929.

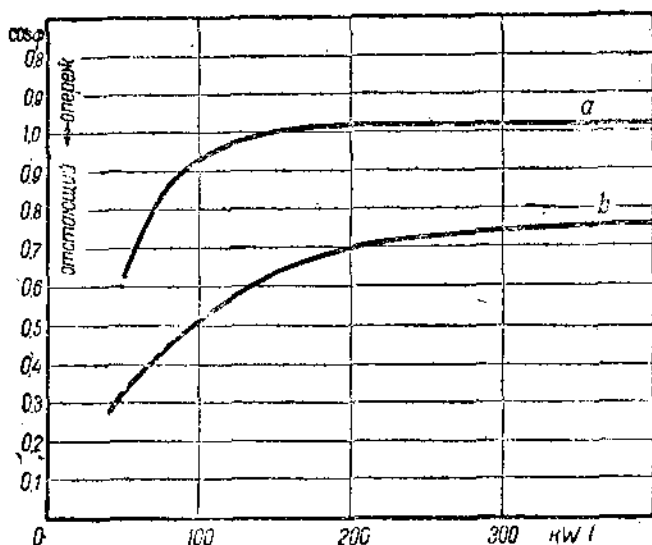
мощности двигателя меняется крайне незначительно; это указывает одновременно и на постоянство угла ϕ_2 в цепи ротора, что возможно лишь при условии, если σ меняется с нагрузкой незначительно. Таким образом лишний раз подтверждается положение, что характеристика асинхронного двигателя при наличии компенсатора становится совершенно жесткой, близкой к неподвижности.

При включении компенсатора ток статора может быть уменьшен на величину, отвечающую его безваттной составляющей. Вследствие этого уменьшаются ваттные потери в обмотке статора, но потери в самом компенсаторе и вращающем его двигателе сводят это преимущество „на-нет“.

Опрокидывающий момент асинхронного двигателя при компенсаторе больше, чем без него, как это легко видеть из круговых диаграмм.

На фиг. 533 прямая AB есть линия центров окружностей тока при $c = \text{const}$ и при изменяющемся p_k .

В конце отдела, посвященного вопросу о каскадных соединениях для регулирования скорости, был дан общий метод для подсчета мощности вторичной машины.

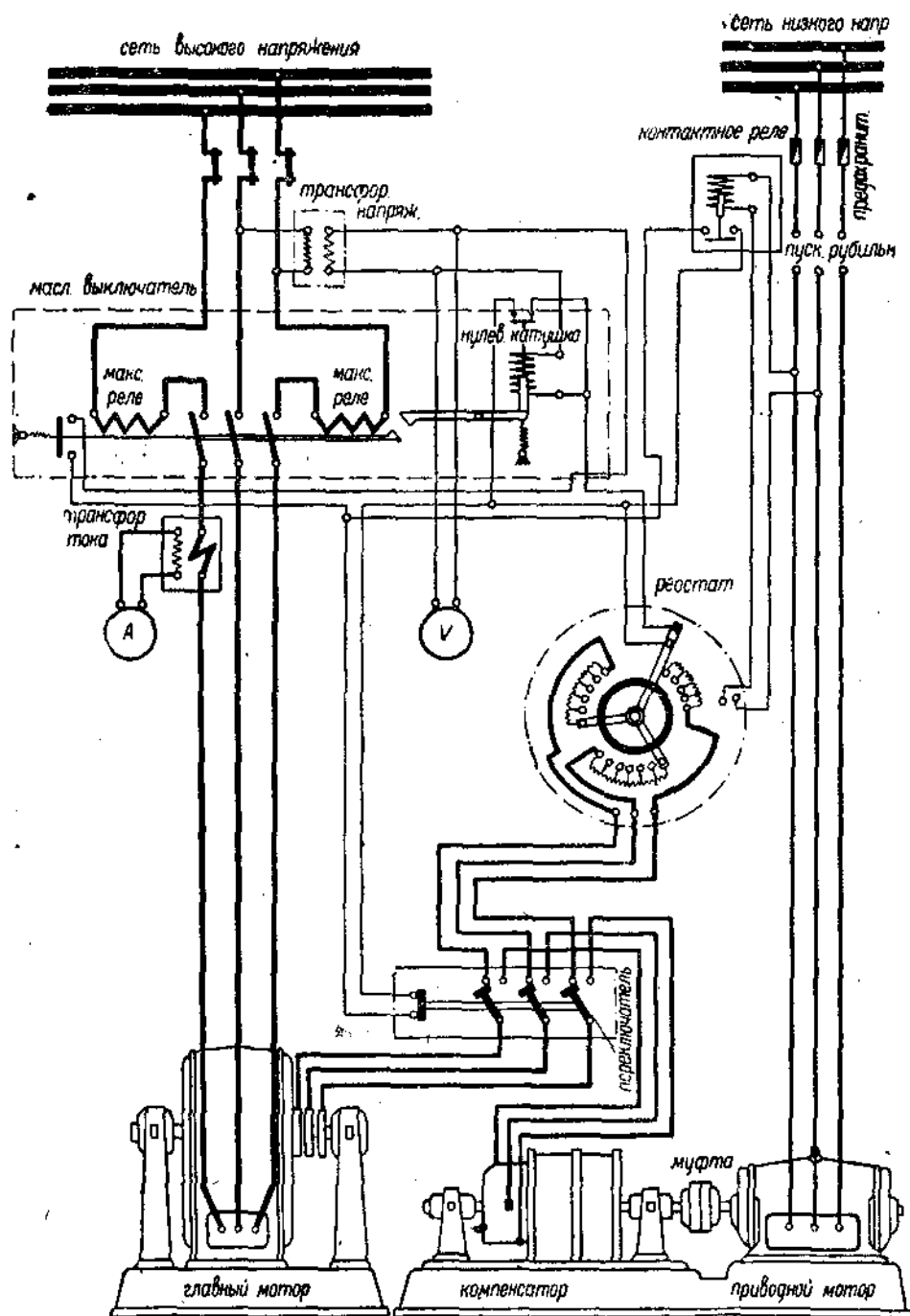


Фиг. 534.

На фиг. 534 приведены сравнительные кривые (a и b) $\cos \phi$ для двигателя 300 kW, 160 об/мин, 32 периода с компенсатором (a) и без него (b).

На фиг. 535 дана электрическая схема установки двигателя для дефибрера 1700 kW 6300 V с компенсатором на 4 kVA.

Помимо улучшения $\cos \phi$ двигателя, фазокомпенсатор оказывает влияние и на другие характеристики и прежде всего на увеличение опрокидывающего момента двигателя. Уменьшение тепловых потерь в двигателе должно повысить его к. п. д., однако добавочные потери в цепи ротора от увеличения сопротивления за счет фазокомпенсатора покрывают уменьшение потерь статора.



Фиг. 535.

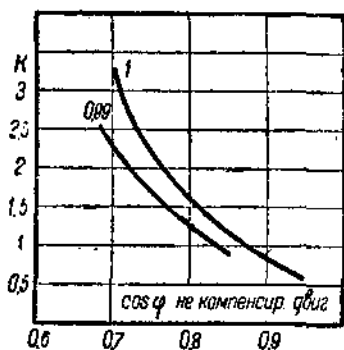
В результате общий к. п. д. установки с компенсатором обычно не выше, чем без него.

Для приближенного подсчета мощности фазокомпенсатора типа Леблана-Шербиуса можно воспользоваться практическими методами, которые предлагаются фирмами для своих фазокомпенсаторов.

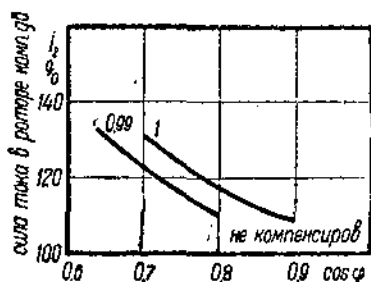
По методу AEG мощность фазокомпенсатора определяется из выражения

$$P_k = \sigma \cdot k \cdot P_M \quad (362)$$

где P_M — мощность асинхронного двигателя в кВт; σ — скольжение асинхронного двигателя при полной нагрузке без компенсации; k —



Фиг. 536 а.



Фиг. 536 б.

коэффициент, зависящий от $\cos \varphi$ некомпенсированного двигателя, определяемый по кривым фиг. 536 а.

Кривые построены для двух случаев: компенсации двигателя на $\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0,99$ (отстающий) при полной нагрузке. Определив P_k , выбирают по каталогу (табл. 185) мощность, равную ей или ближайшую большую.

На фиг. 536 б приведены кривые, показывающие увеличение тока в роторе при компенсации $\cos \varphi$ до 1 и до 0,99 (отстающего) или отношение тока компенсатора к току ротора некомпенсированного двигателя. Мощность и сила тока компенсатора позволяют определить его напряжение:

$$V_k = \frac{kVA}{I_k} \cdot \frac{1000}{\sqrt{3}}.$$

Пример. Необходимо довести коэффициент мощности асинхронного двигателя 3000 В, 260 кВт, к. п. д. 92,5%, $n = 490$ об/мин, ток ротора 215 А с 0,9 до 1,0.

По графику фиг. 536 а $k = 0,85$.

Скольжение двигателя при 490 об/мин $\sigma = 0,02$.

Мощность фазокомпенсатора:

$$P_k = 260 \cdot 0,02 \cdot 0,85 = 2,4 \text{ kVA}$$

ТАБЛИЦА 185.

Т и п	Мощность кВА	Сила тока А	Напряжение V	Число об/мин	Мощность потреби- привода, двигат. кВт	Компенсатор с при- водным двигат. на общей фундамен- тной плите			Примечания
						Вес кг	Цена в терм. марк.	Цена в руб.	
DAD-5	5	262	11	1 420	2,9	370	2 700	2 160	Цена в руб- лях взята с учетом накладного расхода по инструкции Главэлектро
DAD-8	8,5	245 290 365	20 17 13,5	1 420	3,3 3,7 4,2	490	3 300	2 640	
DAD-11	11,5	250 295 350 440	26,5 22,5 19 15	950	3,6 3,9 4,4 5,1	685	4 300	3 450	
						700	4 350	3 500	
DAD-17	17	390 460 545 675	25 21,5 18 14,5	700 710	6 6,7 7,5 8,4	910	5 500	4 400	
						920	5 550	4 450	
DAD-24	24	445 515 600 730 890	31 27 23 19 15,5	570	8 8,4 9 10 11,6	1 335	8 200	6 550	
DAD-35	35	665 750 880 1 060	30,5 27 23 19	570	10,5 11,5 12,5 14,5	1 610	10 300	8 270	
						1 740	10 500	8 400	

Сила тока компенсатора по кривой фиг. 536 б:

$$I_k = 1,09 \cdot 215 = 235 \text{ A.}$$

Напряжение:

$$V_k = \frac{1000 \cdot 4,4}{3 \cdot 235} = 10,8 \text{ V.}$$

Наиболее подходящим компенсатором будет тип DAD-5.

Аналогичный метод подсчета мощности дает для своих компенсаторов и фирма Броун-Бовери.

Для определения необходимого типа служат табл. 186 и 187.

ТАБЛИЦА 186.

E_s	Значение коэффициента c					
	PC-2a	PC-2b	PC-3c	PC-3d	PC-4a	PC-4b
4	0,99	1,15	1,30	1,44	1,03	1,57
5	0,89	1,04	1,19	1,34	0,95	1,45
6	0,82	0,96	1,11	1,25	0,87	1,36
7	0,75	0,90	1,03	1,17	0,81	1,28
8	0,70	0,84	0,97	1,11	0,75	1,21
9	0,65	0,79	0,92	1,05	0,71	1,16
10	0,61	0,74	0,87	1,00	0,67	1,10
11	0,57	0,70	0,83	0,96	0,63	1,06
12	0,54	0,67	0,79	0,93	0,60	1,02
13	0,51	0,63	0,75	0,89	0,57	0,98
14	0,48	0,60	0,72	0,86	0,54	0,95
15	0,46	0,57	0,69	0,83	0,52	0,92
16	0,44	0,55	0,66	0,80	0,50	0,89
17	0,42	0,52	0,63	0,77	0,48	0,86
18	0,40	0,50	0,61	0,74	0,46	0,83
19	0,38	0,48	0,59	0,72	0,44	0,81
20	0,37	0,47	0,57	0,70	0,43	0,79
21	0,36	0,45	0,55	0,68	0,41	0,77
22	0,34	0,43	0,53	0,66	0,40	0,75
23	0,33	0,42	0,52	0,64	0,39	0,73
24	0,32	0,41	0,50	0,62	0,37	0,71
25	0,31	0,39	0,49	0,61	0,36	0,69
26	0,30	0,38	0,47	0,59	0,35	0,68
27	0,29	0,37	0,46	0,58	0,34	0,66
28	0,28	0,36	0,46	0,56	0,33	0,64
29	0,27	0,35	0,43	0,55	0,32	0,63
30	0,27	0,34	0,43	0,54	0,31	0,62

Имея $\cos \varphi$ некомпенсированного двигателя и задавшись его значением при компенсации, находят по табл. 187 значение коэффициента c , характеризующего максимально допустимую силу тока в цепи компенсатора.

По найденному значению c и вычисленной электродвижущей силе скольжения E_s определяют по табл. 186 соответствующий тип компенсатора, данные которых приведены в табл. 188. Значение электродвижущей силы скольжения определяется либо из

$$E_s = \frac{s V_r}{100},$$

либо из

$$E_s = 1,73 \cdot I_r R_r$$

при соединении ротора звездой и

$$E_s = 0,58 \cdot I_r R_r$$

Значения $\cos \varphi$ асинхронных двигателей после применения фазокомпенсатора. *)

°	Коэффициент мощности двигателя до присоединения фазокомпенсатора																		°	
	0,54	0,56	0,58	0,60	0,62	0,64	0,66	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84	0,86	0,88		0,90
0,30	0,62	0,64	0,67	0,69	0,72	0,74	0,76	0,79	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,97	0,98	0,98
0,35	0,63	0,66	0,68	0,71	0,73	0,76	0,78	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,90	0,92	0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99
0,40	0,65	0,67	0,70	0,73	0,75	0,78	0,80	0,82	0,84	0,86	0,88	0,89	0,90	0,92	0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99
0,45	0,66	0,69	0,72	0,75	0,77	0,80	0,82	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00	0,99
0,50	0,68	0,71	0,74	0,76	0,79	0,82	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99
0,55	0,70	0,73	0,76	0,78	0,81	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,95	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
0,60	0,72	0,75	0,78	0,80	0,83	0,85	0,88	0,90	0,92	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
0,65	0,74	0,77	0,79	0,81	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
0,70	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98
0,75	0,77	0,80	0,83	0,85	0,88	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97
0,80	0,79	0,82	0,85	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96
0,85	0,81	0,84	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94
0,90	0,83	0,86	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93
0,95	0,85	0,88	0,91	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,91
1,00	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,89
1,05	0,89	0,92	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,87
1,10	0,90	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,86
1,15	0,92	0,94	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85
1,20	0,94	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,84
1,25	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,83
1,30	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,82
1,35	0,97	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,81
1,40	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80
1,45	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,79
1,50	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,78

*) Подчеркнутые цифры относятся к опреляющему току.

при соединении ротора треугольником, где R_r — сопротивление одной фазы ротора в нагретом состоянии, V_r — напряжение на кольцах при разомкнутом роторе. Желая определить $\cos \varphi$ двигателя со включенным фазокомпенсатором при $\frac{3}{4}$ и половинной нагрузке, необходимо ранее полученное значение коэффициента c умножить соответственно на 1,1 и 1,2 и по новому значению c вновь определить значение $\cos \varphi$, которое и будет соответствовать частичной нагрузке.

Пример. Двигатель мощностью 250 kW, 440 V; $\sigma = 2,8\%$; $I_r = 350$ A, $\cos \varphi = 0,8$; необходимое значение $\cos \varphi$ после компенсации равно 1.

Из таблицы 187 по значениям $\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0,8$ находим $c = 0,75$; 0,80 и 0,85. Выбирая наименьшее из них и определяя э.д. силу скольжения

$$E_s = \frac{2,8 \cdot 440}{100} = 12,3 \text{ V},$$

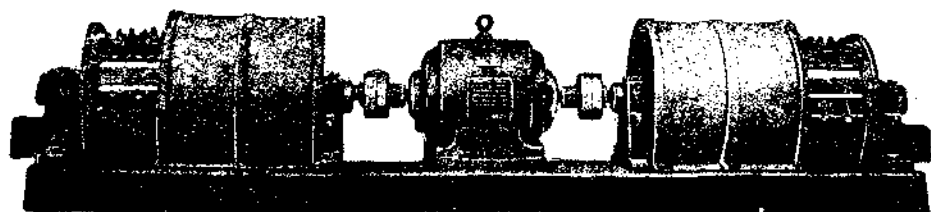
находим из таблицы 186 подходящий тип компенсатора РС-Зс. Данные этого типа помещены в таблице 188. Выбираем тип РС-Зс-с, который может дать ток до 400 A, что вполне соответствует данным двигателя.

При частичной нагрузке, например $\frac{3}{4}$, будем иметь $\cos \varphi = 1$; в этом легко убедиться, произведя расчет вышеуказанным методом.

ТАБЛИЦА 188.

Т и п	Напряжение V	Наиб. допуск. сила тока A	Мощность приводимого двигателя kW	Вес компенс. двиг. и плиты kg	Цена в герм. м. рках	Цена в руб.
Нормальный тип						
PC-2a-S	10,5	250	1,5	205	1 385	1 105
PC-2b-S	14	250	1,5	235	1 655	1 330
PC-3c-S	18	400	2,2	527	2 840	2 280
PC-3d-S	25	400	2,2	537	3 040	2 440
PC-4a-S	13	550	2,2	537	3 060	2 450
PC-4e-L	30	600	2,6	1 340	5 925	4 750
Сдвоенный тип (фиг. 537).						
PC-2a-S-PC-2a	10,5	500	3	405	2 675	2 120
PC-2b-S-PC-2b	14	400	3	465	3 225	2 580
PC-3c-S-PC-3c	18	800	4	975	5 550	4 400
PC-3d-S-PC-3d	25	800	4	995	5 910	4 740
PC-4a-S-PC-4a	13	1 100	4	995	5 950	4 750
PC-4e-L-PC-4e	30	1 200	4,5	2 430	10 930	8 750

По своим свойствам фазокомпенсатор Леблана-Шербиуса отличается от системы Леблана более благоприятными условиями ком-



Фиг. 537.

пенсации при малых нагрузках, что объясняется отсутствием воздушного зазора.

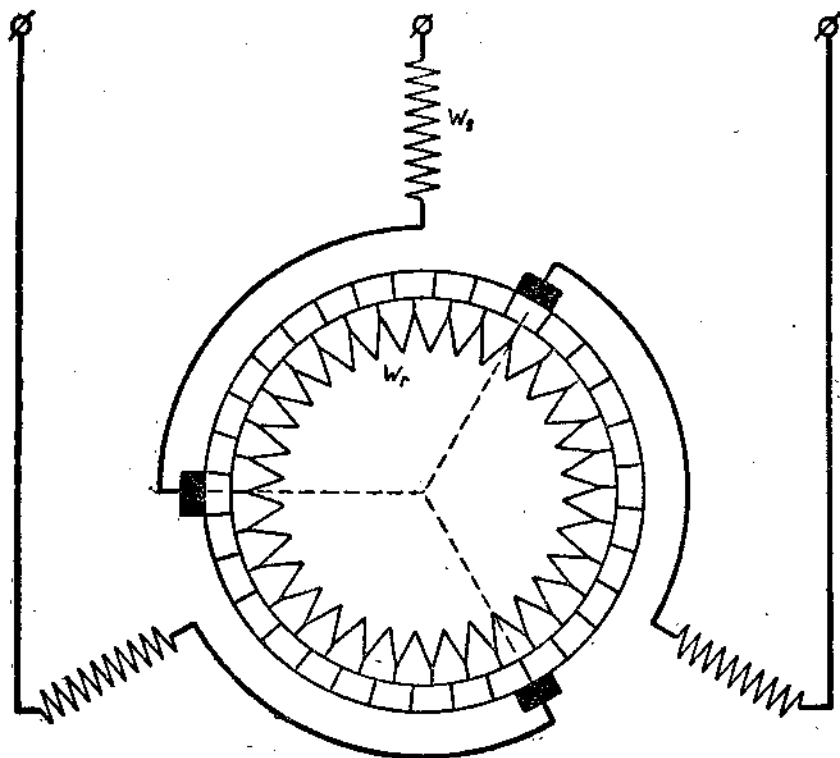
Фазокомпенсаторы системы Леблана-Шербиуса изготавливаются заводом „Электросила“. Данные о них приведены в табл. 189.

ТАБЛИЦА 189.

Т и п	Число об/мин n	Мощность кВА	Напряжение V	Сила тока А	Потребл. мощ- ность kW	Стоимость в руб.
ФК-10-1500	1500	3,5	8 11	253 184	1,5 1,0	1430
ФК-20-1500	1500	5,5	8,5 11 13,5	375 293 236	2,8 2,1 1,5	1740
ФК-30-1000	1000	7,5	9 11 14	480 395 310	2,9 2,8 2,5	2400
ФК-40-1000	1000	11	10,5 14 17,5	605 455 364	3,5 2,5 2,0	3000
ФК-50-750	750	17	14,5 17,5 21,5	678 562 457	3,5 3,0 2,6	3900
ФК-60-600	600	25	20,5 24,5 28	705 590 516	3,5 2,6 2,6	6150
ФК-70-600	600	35	21,5 25 29	940 810 700	10 8 6	7130

Отсутствие компенсации при нагрузках, близких к холостому ходу, делает бесстаторный тип компенсатора непригодным для приводов с сильно колеблющейся нагрузкой; несмотря на свою простоту, бесстаторный фазокомпенсатор непригоден также для двигателей, работающих с большим скольжением, как, например, прокатные, так как рассчитывается на небольшое напряжение.

Чтобы иметь возможность компенсировать $\cos \varphi$ при всевозможных нагрузках (от холостого хода до некоторой перегрузки), был предложен ряд систем фазокомпенсаторов с обмотками на статоре. Из машин такого рода простейшей является компенсатор с последовательной обмоткой возбуждения на статоре.

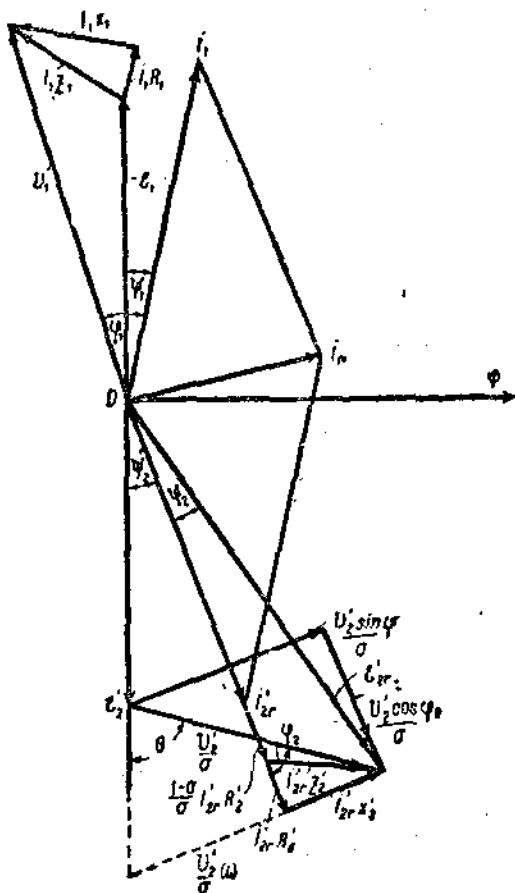


Фиг. 538.

Компенсатор с последовательным возбуждением. На фиг. 538 представлена принципиальная электрическая схема компенсатора с последовательным возбуждением. Конструктивно эта машина отличается от компенсатора Леблана-Шербиуса только в том отношении, что имеет статор, на котором размещается в пазах трехфазная обмотка, включаемая последовательно со щетками коллектора ротора. Путем сдвига щеток по коллектору можно установить любой угол между осями обмоток статора и ротора, так как положение осей последней фиксируется положением щеток.

Практически названный угол устанавливается в 90 эл. градусов. Таким образом ток ротора асинхронного двигателя, проходя по обмоткам статора и ротора компенсатора, создает магнитные потоки, которые оказываются пространственно сдвинутыми на угол в 90°.

Эти магнитные поля статора и ротора, взаимодействуя, складываются между собой и дают одно равнодействующее магнитное поле взаимной индукции, индуктирующее в названных обмотках э.-д. силы, сдвинутые взаимно во времени на 90°, так как равнодействующее магнитное поле пересекает провода обмоток статора и ротора в последовательном порядке через $1/4$ периода. (Как выше было сказано, эти обмотки пространственно сдвинуты на 90°.) Каждая из э.-д. сил как статора, так и ротора отстает по фазе на 90° от магнитного потока взаимной индукции, пронизывающего эти обмотки. Взаимодействуя, они складываются в одну равнодействующую э.-д. силу E_k , которая при надлежащих установке щеток и направлении и скорости вращения ротора компенсатора оказывается опережающей по фазе ток I_{2r}' . Однако в этом случае, в отличие от компенсатора Леблана-Шербиуса, э.-д. сила E_k оказывается опережающей ток I_{2r}' на угол, не равный 90°. На фиг. 539 представлена векторная диаграмма компенсатора с последовательным возбуждением; φ_2 — угол сдвига напряжения компенсатора V_2' относительно тока I_{2r}' . Это напряжение состоит из двух составляющих: одной — $V_2' \sin \varphi_2$, опережающей I_{2r}' на 90°, и второй — $V_2' \cos \varphi_2$, совпадающей по фазе с током I_{2r}' . Чтобы получить при заданном токе I_{2r}' подобный компенсирующий эффект при компенсаторе Леблана, э.-д. сила последнего должна быть больше V_2' , т. е. необходимо большее по величине скольжение σ . Таким образом компенсатор рассматриваемого типа дает при малых нагрузках больший компенсирующий эффект, нежели компенсатор Леблана.



Фиг. 539.

Как видно из описания компенсатора с последовательным возбуждением, эта машина не отличается от нормальной трехфазной коллекторной машины-серис. Поэтому при надлежащем сдвиге щеток здесь возможно явление

ние самовозбуждения, когда V_2' будет совпадать по фазе с током I_2' . При этом компенсатор обратится в самовозбуждающийся генератор трехфазного тока, частота которого будет зависеть только от параметров цепи и угла сдвига щеток. Таким образом, как только наступит процесс самовозбуждения компенсатора и он обратится в генератор переменного тока с постоянной частотой, асинхронный двигатель обратится в машину двойного питания, питаемую со стороны статора и ротора токами различных, но постоянных частот. При таком условии механическая характеристика асинхронного двигателя станет неподвижной. Если, однако, при резком изменении нагрузки число оборотов асинхронного двигателя изменится, то частота э.д. силы ротора окажется отличной от частоты напряжения компенсатора, и взаимодействие их прекратится. При этом обмотки компенсатора станут простым индуктивным сопротивлением в цепи ротора асинхронного двигателя. Вследствие этого его опрокидывающий момент окажется меньше не только момента компенсированного двигателя, но и опрокидывающего момента, отвечающего случаю работы при короткозамкнутом роторе.

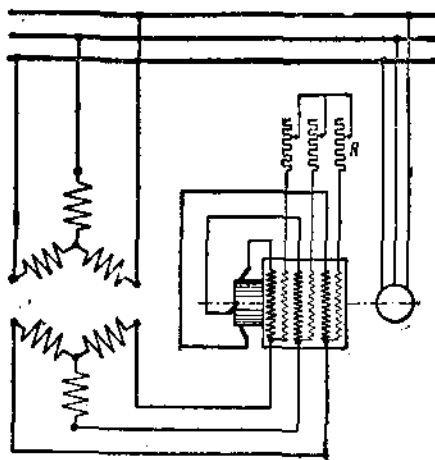
Чтобы сделать работу асинхронного двигателя с самовозбуждающимся компенсатором последовательного возбуждения более устойчивой, эти компенсаторы выполняются с сильно насыщенной магнитной цепью. Такие самовозбуждающиеся компенсаторы с последовательной обмоткой возбуждения на статоре носят название компенсаторов Уокера в отличие от таких же по конструкции компенсаторов, но работающих нормально в несамовозбужденном режиме и возбуждаемых, подобно компенсатору Леблана, роторным током асинхронного двигателя.

Возможен еще один тип машины, возбуждаемой роторным током; это — компенсированный коллекторный альтернатор последовательного возбуждения. На статоре подобного альтернатора должны быть расположены две последовательных обмотки (или одна обмотка с большим числом витков, расположенная под некоторым углом к оси щеток ротора), из которых одна служит для компенсации поля ротора и ось ее располагается по оси щеток, а вторая должна быть расположена под некоторым углом к первой. Первая обмотка — компенсационная, а вторая — обмотка возбуждения. В цепи такой машины будут индуцироваться э.д. силы, которые, складываясь, дадут равнодействующую, состоящую из э.д. силы самоиндукции обмотки возбуждения и э.д. силы вращения ротора. Первая отстает по фазе от роторного тока на 90° , а вторая находится с ним в фазе или отличается на 180° , в зависимости от расположения обмоток. Такая машина, не давая надлежащего компенсирующего эффекта в качестве компенсатора, в указанной форме не применяется; она применяется исключительно при наличии еще двух параллельных обмоток возбуждения на ее статоре под названием компенсатора Зейца, который будет рассмотрен ниже.

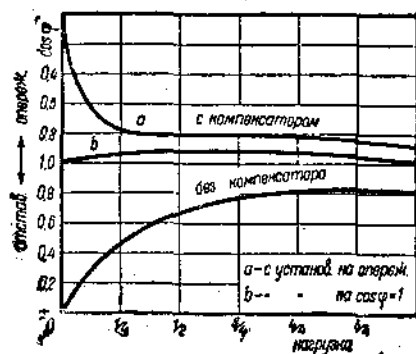
Компенсатор с параллельным возбуждением. На фиг. 540 изображена схема шунтового фазокомпенсатора, предложенного Шербиусом, в таком виде, как ее выполняет фирма Sachsenwerk. На статоре имеется компенсационная обмотка, включенная последовательно с якорем, и шунтовая (возбудительная). Работа компенсатора удовлетворительна при всех нагрузках до холостого хода (фиг. 541). Степень компенсации может регулироваться реостатом обмотки возбуждения.

Компенсатор Шербиуса (не Леблана-Шербиуса) с параллельным возбуждением представляет собой по существу коллекторный альтер-

натор с явно выраженными полюсами. Эта машина работает исключительно в самовозбужденном режиме, однако, благодаря ответвлению в виде шунтовой обмотки возбуждения, работа агрегата



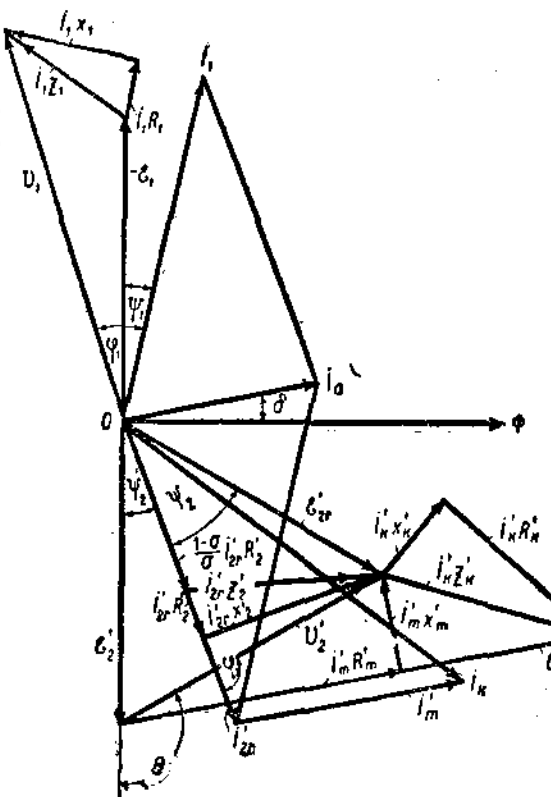
Фиг. 540.



Фиг. 541.

оказывается устойчивой. Вследствие наличия возбуждения, независимого от силы тока ротора компенсируемого двигателя, компенсатор Шербиуса дает значительный компенсирующий эффект не только при нагрузке, но и при холостом ходе главного двигателя; поэтому он с успехом применяется в установках с сильно колеблющейся нагрузкой, как, например, прокатные станы, шахтные подъемники и т. п.

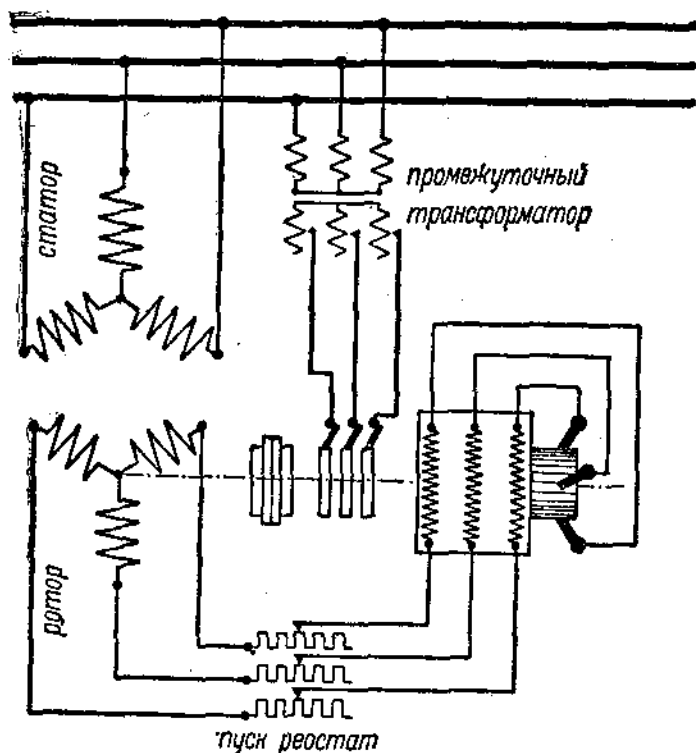
На фиг. 542 дана векторная диаграмма асинхронного двигателя, снабженного компенсатором Шербиуса. Напряжение на коллекторе компенсатора V_2' совместно с ваттным ($I_k' R_k'$) и безваттным ($I_k' X_k'$) падениями напряжения в обмотках ротора и компенсационной уравнивают э.-д. силу компенсатора E_k' . Так как E_k' , являясь э.-д. силой вращения, должна совпадать по



Фиг. 542.

— $V_2' \cos \theta$, $I_k' Z_k' \cong 0$ и $\theta \cong \pi$, э.д. сила E_x' лишь ничтожно уменьшает свое численное значение в виду большой инерции индуктивного сопротивления X , включенного последовательно с обмоткой W_x , магнитный поток которой индуцирует э.д. силу E_x' ; последняя, продолжая оставаться отстающей от V_2' на угол, близкий к 90° , оказывается опережающей E_2' почти на такой же угол, что и гарантирует значительный компенсирующий эффект при малых нагрузках.

Наоборот, с нарастанием нагрузки и скольжения двигателя первенствующую роль в компенсации принимает на себя э.д. сила E_2' , которая возрастает с увеличением α , а следовательно и напряжения на кольцах, и, в виду близости в это время угла θ к 90° , становится опережающей э.д. силу E_2' почти на 90° . Одновременно э.д. сила E_s' возрастает приблизи-



Фиг. 545.

тельно пропорционально току I_2 , и нагрузке, получая большую составляющую, противоположную по фазе E_2' , и вызывает дополнительное скольжение, обуславливая тем самым компаундирование двигателя.

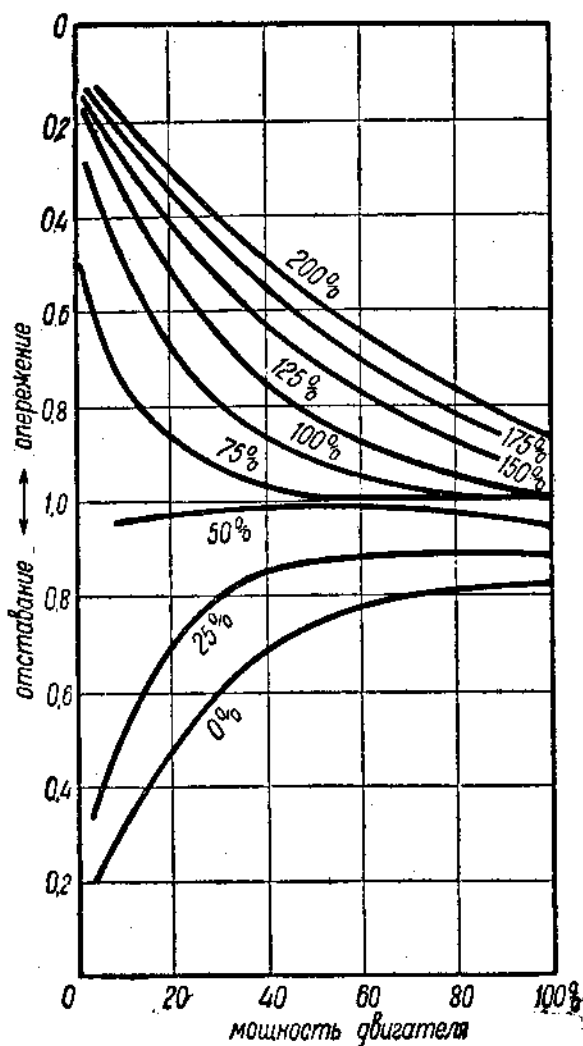
Таким образом компенсатор со смешанным возбуждением системы Зейца, хотя и несколько сложен, обладает большими достоинствами, выгодно отличающими его от всех рассмотренных выше систем компенсаторов, а именно: он дает нужный компенсирующий эффект при всех нагрузках — от перегрузки до холостого хода включительно, и компаундирует компенсируемый двигатель, сообщая его характеристике ту мягкость, без которой

немыслима работа на ударную нагрузку с широким использованием живой силы маховика. Наконец, опрокидывающий момент асинхронного двигателя, снабженного компенсатором Зейца, становится выше, что повышает способность двигателя к перегрузке.

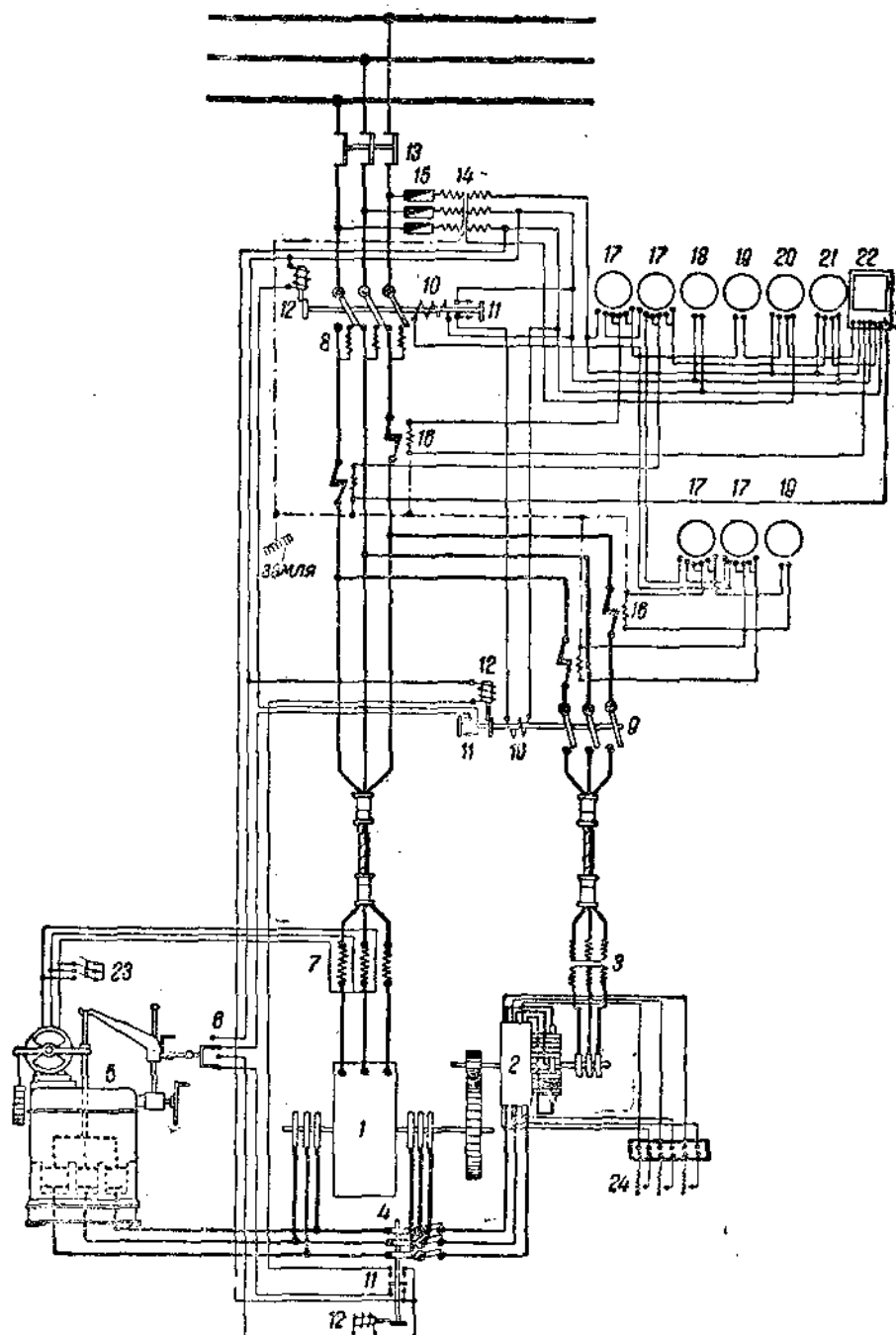
2) Компенсаторы с независимым возбуждением. Близким по своему шунтовому компенсатору является компенсатор с независимым возбуждением, который, благодаря способности поддерживать высокий $\cos \varphi$ при всех нагрузках, получил, так же как и первый, большое распространение для фабрично-заводских сетей.

В выполнении фирмы SSW компенсатор Кози́чка состоит из якоря с обмоткой постоянного тока, с коллектором и кольцами. На статоре наложена нормальная трехфазная компенсационная обмотка с разомкнутой нулевой точкой, соединенная одним концом со щетками компенсатора, другим с ротором компенсируемого двигателя через контактные кольца последнего (фиг. 545). Кольца компенсатора соединяются с сетью через промежуточный трансформатор, понижающий сетевое напряжение до напряжения ротора. При независимом возбуждении компенсатор приобретает постоянное магнитное поле, а асинхронный двигатель получает постоянное, не зависящее от его скольжения, возбуждение, в чем и состоит отличие этого типа компенсатора от ранее описанных.

Скомпенсированный при полной нагрузке до $\cos \varphi = 1$ асинхронный двигатель при частичной нагрузке требует меньше безваттной энергии; однако, получая ее всегда в одинаковом количестве, он начнет отдавать часть энергии в сеть и работать с опережающим



Фиг. 546.



Фиг. 547. 1 — главный асинхронный двигатель, 2 — коллекторная машина, 3 — трансформатор для независимого возбуждения, 4 — переключатель для переключения обмотки ротора с треугольника на звезду после окончания пуска главного двигателя и для включения фазокомпенсатора 2, 5 — пусковой реостат и регулятор скольжения, 6—24 — вспомогательная аппаратура и измерительные приборы.

созф. Регулировка на различный созф производится изменением напряжения, подводимого к кольцам. На фиг. 546 даны характеристики асинхронного двигателя с компенсатором независимого возбуждения в функции напряжения на кольцах компенсатора. За 100% принято напряжение, при котором двигатель работает с $\cos\varphi = 1$ на полной нагрузке.

Совпадение числа периодов тока компенсатора и роторного тока асинхронного двигателя может иметь место только при механическом соединении валов обеих машин. Это обстоятельство является крупным недостатком компенсаторов с посторонним возбуждением. В случае одинакового числа полюсов компенсатора и двигателя механическая связь выполняется непосредственным соединением (для быстроходных двигателей), в противном случае через зубчатую или цепную передачу (ременная передача недопустима в виду возможности получения скольжения при толчках нагрузки). На фиг. 547 изображена подробная схема прокатного двигателя с фазокомпенсатором независимого возбуждения, мощностью 55 kVA, 45 V, 715 A, 425 об/мин. Компенсатор соединен с двигателем через зубчатки.

Компенсаторы с независимым возбуждением могут выполняться без обмотки на статоре в виде преобразователей числа периодов, изготавливаемых преимущественно для малых мощностей до 50 kVA (например тип RAD заводов AEG).

Отсутствие компенсационной обмотки на статоре вызывает большую силу тока, проходящего по кольцам компенсатора, т. е. необходимость усиления токоведущих частей всех регулировочных аппаратов. Свойства фазокомпенсаторов с независимым возбуждением Гейланда и Козичека были рассмотрены в главе III с.

В табл. 190 приводятся данные фазокомпенсаторов с независимым возбуждением типа преобразователей частоты завода AEG. При сравнении стоимости их и бесстаторных компенсаторов той же фирмы получается разница в 15—20% в пользу последних.

Для иллюстрации рассмотренных типов фазокомпенсаторов дается сводная таблица 191.

На фиг. 548 представлены механические характеристики асинхронного двигателя в каскадном соединении с разного рода фазокомпенсаторами, где

кривая	1	без фазокомпенсатора,
"	2	с фазокомпенсатором Леблана-Шербиуса,
"	3	" сериес-компенсатором,
"	4	" фазокомпенсатором Уокера,
"	5	" " Шербиуса,
"	6	" " Зейца,
"	7	" " Гейланда или Козичека.

Определение необходимой мощности фазокомпенсатора можно показать на примере, пользуясь изложенным выше способом той же фирмы AEG по формуле (362):

$$P_k = P \cdot \sigma \cdot k$$

и по кривым фиг. 549 а и 549 б.

Т и п	kVA	Напряжение V	Сила тока A	Число об/мин.	Сила тока в 1 кольце A	Число колец	Мощность трансформат. кВА	Потери вклоч трансформат. кВт	Вес в kg	Цена в марках	Цена в рублях
RAD - $\frac{7}{4}$	7	18 16	225 253	1 500	280 315	3	8,5 8,5	2,9 3,1	350	3 000	2 400
RAD - $\frac{9}{4}$	9	23 15	227 347		285 435		11	3,5 4,6	475	3 900	3 180
RAD - $\frac{14}{4}$	14	29 19	280 425		180 270	6	17	4,8	600	4 500	3 600
RAD - $\frac{18}{4}$	18	41 18	255 578		165 370		21,5	5,9 9,5	775	5 400	4 330
RAD - $\frac{8}{6}$	8	17 13	270 355	1 000	340 445	3	9,5	3,4 4,1	525	4 200	3 370
RAD - $\frac{13}{6}$	13	24 14	313 536		390 670	3	15,5	5 7	750	5 700	4 560
RAD - $\frac{20}{6}$	20	34 19	340 610		220 390	6	24	6,4 9,1	1 000	6 500	5 200
RAD - $\frac{25}{6}$	25	41 17	353 850		225 540	6	30	7,9 13,5	1 250	7 700	6 160
RAD - $\frac{10}{8}$	10	17 11,5	340 507	750	425 630	3	13	4,5 5,8	700	5 400	4 330
RAD - $\frac{14}{8}$	14	20	405		500		17	5,9	1 000	6 800	5 450

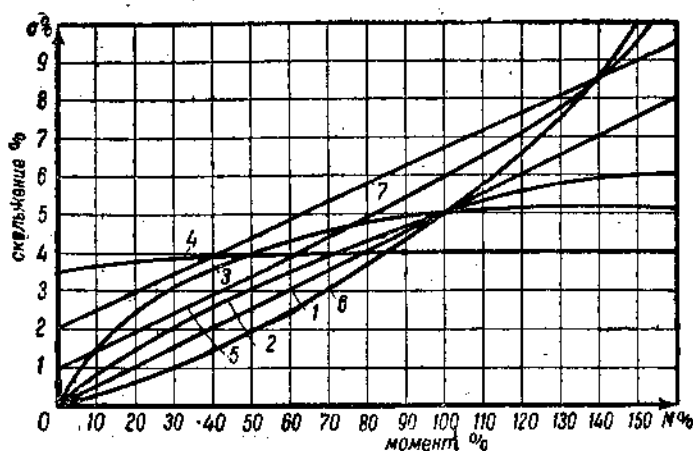
Т и п	kVA	Напряжение V	Сила тока A	Число об/мин	Сила тока в 1 кольце A	Число колец	Мощность трансформат. кVA	Потери кал. трансформат. кВт	Вес в kg	Цена в марках	Цена в рублях
RAD - $\frac{25}{8}$	25	32 18	452 803	750	290 510	6	30	8,2 11,5	1 250	8 000	6 400
RAD - $\frac{30}{8}$	30	37 17	468 1 020		300 6 500		36	9,6 15,5	1 600	9 300	7 450
RAD - $\frac{12}{10}$	12	15 11,5	463 605	600	580 760	3	14,5	5,6 6,7	950	6 700	5 370
RAD - $\frac{18}{10}$	18	20 13	520 800		650 1 000		21,5	7,4 9,8	1 250	8 200	6 600
RAD - $\frac{29}{10}$	29	29 17	580 990		370 630	6	35	9,9 13,5	1 650	9 800	7 850
RAD - $\frac{37}{10}$	37	37 17	580 1 260		370 800		44	12 19	2 275	12 000	9 600
RAD - $\frac{14}{12}$	14	15 11,5	540 705	500	680 890	3	17	6,7	1 225	8 100	6 500
RAD - $\frac{21}{12}$	21	20 13	605 935		750 1 170		25	8,7 11,5	1 625	10 100	8 100
RAD - $\frac{37}{12}$	37	31 17	690 1 260		445 800	6	44	12,5 17,5	2 350	12 300	9 850
RAD - $\frac{46}{12}$	46	41 17	648 1 560		415 1 000		55	14,5 24	3 150	15 200	12 200

Наименование компонента	Система возбуждения	Статор	Механическое соединение с компенсируемым двигателем	Область компенсации	Механическая характеристика каскадного агрегата	Опрокидывающий момент каскадного агрегата	Работа на ударную нагрузку с применением маховика	Примечания	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Лебана	Вторичным током асинхронн. двиг.	Обмоток нет	Необязательно	Только при нагрузке	Жестче, чем асинхр. двиг.	Выше, чем асинхр. двиг.	Невозможна	При выполнении по системе Шербуса статор отсутствует.
2	Последействие	Вторичным током асинхронн. двиг.	Последоват. обмотка возбуждения	Необязательно	Только при нагрузке	Жестче, чем у асинхр. дв.	Выше, чем асинхр. двиг.	Невозможна	Нормальная последств. коллект. машина с углом сдвига фазок ок. 90° (эл.)
3	Уокера	Самовозбуждающийся	Последоват. обмотка возбуждения	Необязательно	От хол. хода до полной нагрузки	Жестче, чем у асинхр. дв.	Не выше, чем асинхр. двигатель	Невозможна	Компенсированный коллекторный альтернатор с явно выраженными полюсами, возбуждаемый со статора
4	Шербуса	Самовозбуждающийся	Послед. ком-пенс. Шунт. возбужд.	Необязательно	От хол. хода до перегрузки	Как у асинхронного двигателя	Выше, чем асинхр. двиг.	Возможна для небольших скольж.	
5	Зейца	Самовозбуждающийся	1) Послед. ком-пенс. 2) Послед. возбужд. 3) Шунт. возб. с заттн. сопротивлен. 4) Сбавзаттн. сопротивл.	Необязательно	От хол. хода до перегрузки	Мягкая	Выше, чем асинхр. двиг.	Возможна для значительных скольжений	
6	Гейланда	Независимое возбуждение	Послед. и шунт. обмот. доп. полюс. для улучш. коммутир.	Обязательно	При всех скольжениях (вышениже синхронизма)	Нормальная	Выше, чем асинхр. двиг.	Возможна для малых скольжений	Преобразователь частоты
7	Козичка	Независимое возбуждение	Последоват. ком-пенсаци. обмотка	Обязательно	При всех скольж. (выше и ниже синхронизма)	Нормальная	Выше, чем асинхр. двиг.	Возможна для малых скольжений	Компенсированный коллектор. альтернат. возбужд. со стороны ротора

Пример. Двигатель 460 кВт, 984 об/мин, $\cos \varphi = 0,91$, к. п. д. 94%, ток ротора 280 А должен быть скомпенсирован до $\cos \varphi = 0,98$ (опережающего).

Скольжение $\sigma = 0,016$.

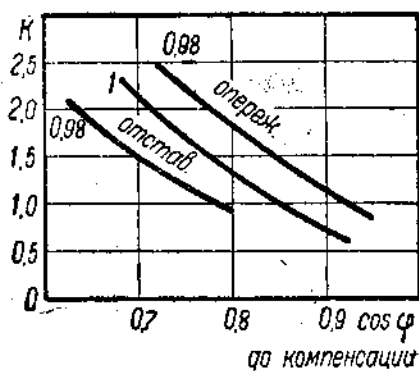
$$P_k = P_m \cdot \sigma \cdot k = 460 \cdot 0,016 \cdot 1,05 = 7,7 \text{ kVA.}$$



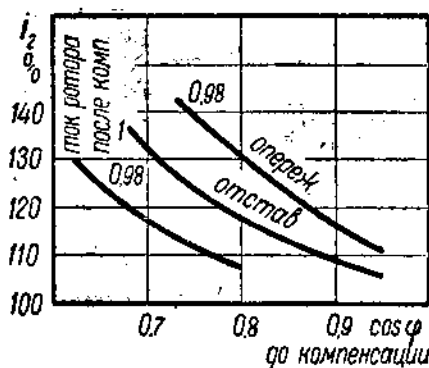
Фиг. 548.

Сила тока компенсатора по фиг. 549 б

$$I_k = 1,14 \cdot 280 = 320 \text{ A.}$$



Фиг. 549 а.



Фиг. 549 б.

Напряжение:

$$V_k = \frac{1000 \cdot 7,7}{\sqrt{3} \cdot 320} = 13,9 \text{ V.}$$

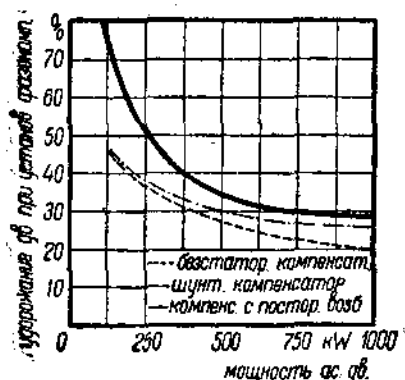
Выбирается тип RAD = $\frac{8}{6}$.

На основании многочисленных смет иностранных фирм, а также данных ВЭО, удалось установить примерное соотношение стоимостей между асинхронным двигателем без компенсатора и с компенсатором различных систем. Результаты удорожания стоимости двигателя при установке фазокомпенсаторов представлены в виде кривых фиг. 550 для различных мощностей асинхронных двигателей.

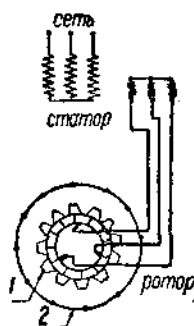
Сравнение этих кривых с данными таблиц 183 и 184 для синхронизированных двигателей указывает на бесспорное преимущество улучшения $\cos \varphi$ при помощи фазокомпенсаторов бесстаторного типа и шунтовых для всех мощностей выше 100 kW и при помощи компенсаторов с независимым возбуждением для мощностей выше 350 kW.

При улучшении $\cos \varphi$ этим путем в двигателях ниже 100—150 kW приходится прибегать к большему типу компенсатора, чем нужно по расчету, что сильно удорожает установку.

Для таких случаев фирмы предлагают специальные компенсированные асинхронные двигатели, представляющие соединение фазокомпенсатора и двигателя в одной машине.



Фиг. 550.



Фиг. 551.

§ 10. Компенсированные асинхронные двигатели.

В основу всех существующих компенсированных двигателей положены принципы Гейланда и Осноса, предложенные около 30 лет тому назад, но получившие практическое осуществление только за последние годы с введением учета безваттной энергии.

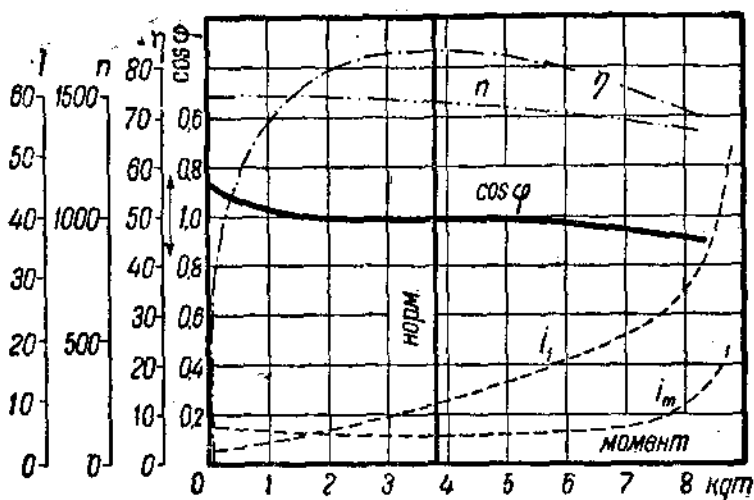
Статор и ротор двигателя Гейланда имеют по две обмотки. На статоре наложены рабочая обмотка и добавочная компенсирующая с небольшим числом витков. Для последней может быть также использована часть витков рабочей обмотки статора. При помощи трех щеток и коллектора компенсирующая обмотка соединяется с обмоткой возбуждения 1 фиг. 551, заложенной в роторе. Последняя выполняется наподобие нормальной обмотки якоря постоянного тока. Ток возбуждения, необходимый для создания магнитного потока, преобразовывается при помощи коллектора в ток частоты

скольжения. Выше указывалось, что безваттная мощность, потребляемая двигателем, пропорциональна частоте тока возбуждения, а так как в данном случае частота скольжения равна

$$f_2 = sf_1,$$

то и реактивная составляющая мощности, потребляемой двигателем из сети, очень ничтожна. Кроме обмотки возбуждения, на роторе наложена вторая рабочая короткозамкнутая обмотка 2, выполненная в виде беличьего колеса и несущая ваттную нагрузку.

Благодаря демпферному действию второй обмотки коммутация в двигателе во время работы при нормальной скорости протекает удовлетворительно. Хуже — при пуске двигателя по причине большого значения трансформаторной электродвижущей силы ко-



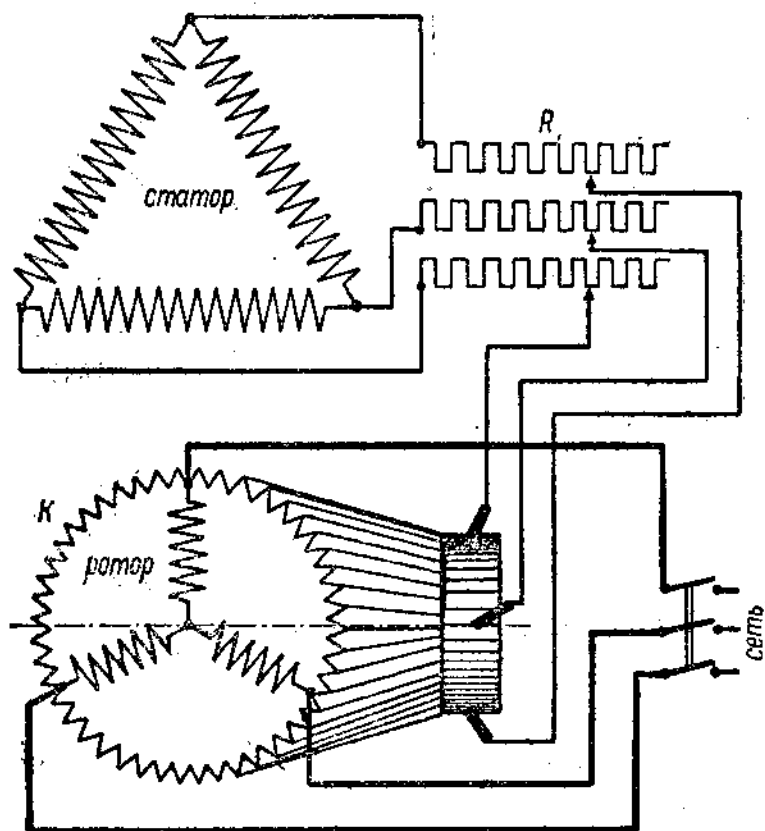
Фиг. 552.

роткозамкнутого контура. Последнее обстоятельство не позволяет выполнять двигатели Гейланда большой мощности. Фирмой Сименс-Шуккерт они изготавливаются до 5,5 kW. На фиг. 552 даны характеристики такого двигателя. Из последних видно, что двигатель сохраняет свою асинхронную характеристику скорости. Компенсирующий ток i_m остается почти все время постоянным. Кривая $\cos \varphi$ показывает, что двигатель потребляет при холостом ходе опережающий безваттный ток. Начиная с 25% нагрузки и до 125% $\cos \varphi$ держится равным единице и падает только при значительных перегрузках.

Двигатель Осноса подобен по свойствам двигателю Гейланда, но отличается от него конструктивно. Роли статора и ротора в нем взаимно переменены. Двигатель приключается к сети через ротор. Статор же соединяется с пусковым реостатом R (фиг. 553). Компенсирующая обмотка двигателя K наложена на ротор и соеди-

няется с обмоткой статора через три щетки и коллектор, который, так же как и в двигателе Гейланда, преобразовывает ток с частотой сети в ток частоты скольжения.

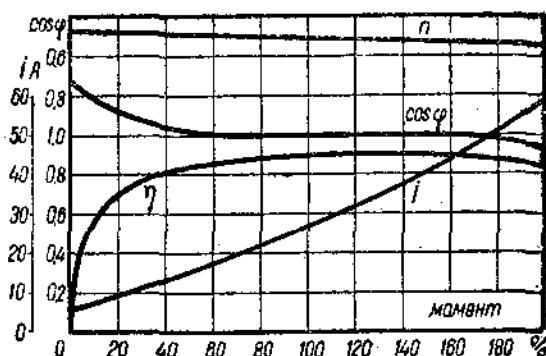
Так как в двигателе Осноса компенсирующая и рабочая обмотки заложены на роторе, то поле, создаваемое первичной (роторной) обмоткой, вращается по отношению к компенсирующей обмотке с одной и той же скоростью, вследствие чего трансформаторная электродвижущая сила короткозамкнутой секции остается постоян-



Фиг. 553.

ной при всех условиях работы, т. е. и при пуске. Для улучшения коммутации двигателя за счет уменьшения трансформаторной электродвижущей силы обмотка двигателя Осноса выполняется с укороченным шагом. Это обстоятельство позволяет значительно повысить мощность этого типа (свыше 1000 kW). На фиг. 554 представлены характеристики двигателя Осноса на 15 kW завода Сименс-Шуккерт, подобные характеристикам двигателя Гейланда. Фирма изготавливает двигатели до мощности 34 kW включительно.

В табл. 192 приведены стоимости стандартных мощностей двигателей Сименс-Шуккерт по типу Осноса.



Фиг. 554.

Массовое производство двигателей Осноса развернуто германской фирмой Саксенверк.

ТАБЛИЦА 192.

Мощность kW	Т и п	Число об/мин синхрон.	К. п. д. %	Стоимость в германск. марках	Стоимость в рублях с накладн. расходами	Вес kg
9	91-4	1500	85	1550	1145	170
12,5	124-4	1500	86	1740	1280	215
17	134-4	1500	87	2040	1505	305
24	154-4	1500	87	2560	1890	410
34	164-4	1500	89	3050	2250	565
9	124-6	1000	86	1840	1355	210
12,5	134-6	1000	86	2170	1600	314
18	154-6	1000	87	2600	1920	400
24	164-6	1000	87	3100	2280	555
34	184-6	1000	89	3550	2690	720
34	204-8	750	89	4250	3130	800

В схеме Осноса фирма изменила способ соединения обмотки статора с треугольника на звезду (фиг. 555). Кольцами двигатель включен на сеть, пуск его производится реостатом в статоре. До мощностей 250 kW фирма Саксенверк строит стандартный тип двигателя, данные которого приведены в табл. 193.

Большие мощности изготавливаются по специальному запросу. Из сопоставления двигателей Сименс-Шуккерт и Саксенверк видно, что последней фирме удалось, благодаря массовому производству, дать двигатели по цене ниже первой в среднем на 30%.

ТАБЛИ
Компенсированные асинхронные двигатели

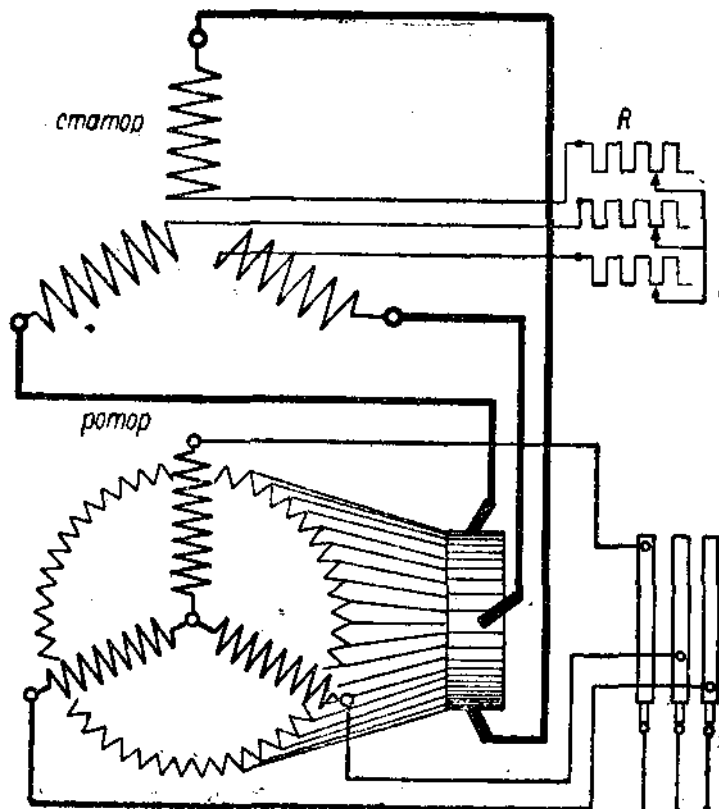
Величина	Напряжение V	Исполнение	cos φ = 1				
			Мощность кВА	К. п. д. %	Об/мин.		Потреб. без- варт. мощн. при хол. ходе кВА
					При холост. ходе	При полной нагрузке	
52	До 500 V	Только для непосредствен- ного соединения и ре- менного привода	5,5	84,5	1 560	1 500	—
53			7,5	85	1 560	1 500	—
62			10	86,5	1 540	1 500	—
63			13	87	1 540	1 500	—
73			20	88	1 480	1 440	4
82			30	89	1 480	1 440	7,2
83			35	90	1 480	1 440	9,3
91			40	90,5	1 480	1 445	11
92			50	91	1 480	1 445	13
93			64	91,5	1 480	1 445	16
101			80	92,0	1 480	1 450	18
102			100	92,0	1 480	1 450	22
103			125	92,5	1 480	1 450	26
111			160	93	1 480	1 460	35
112			200	93,5	1 480	1 460	43
113			250	94	1 480	1 460	52
52	До 500 V	Только для непосредственного соединения и ременного привода	3,5	82	1 020	970	—
53			5	82			—
62			6,5	84,5	1 045	1 000	—
63			9,3	85			—
73			15	86			3
82			22	88		950	5,5
83			27	88,5			6,7
91			32	89			9
92			40	89,5	985	955	11,5
93			50	90,5			14
101			64	91			16
102			80	91,5		960	20
103			100	92			24
111			225	92,5			27
112			160	93		965	35
113			200	93,5		970	43
63	До 500 V		6	83	770	750	0,8
73			10	83,5		700	1,4
82			15	86		705	2,5
83			18	86		705	3
91			25	87,5		710	7
92			30	88,5		710	8,5
93			37	89	740	715	10,5
101			50	90		715	13,5
102			64	91		720	17
103			80	91,5		720	20
111			100	92		725	22
112			125	92,5		725	28
113			160	93		725	35

193.
 рмы Саксенверк, тип KD, защищенный.

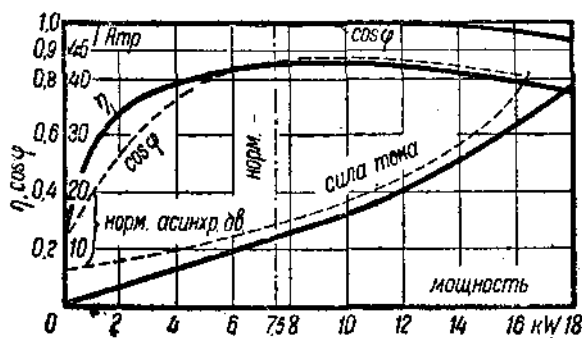
$\cos \varphi = 0,9$ опережающий

Мощность кВА	К. п. д. %	Об/мин		Потребл. безваптн. мощн. кВА		Вес kg	Цена в германских марках	Цена в руб. без пикива и салзак
		При холостом ходе	При полной нагрузке	При холостом ходе	При полной нагрузке			
—	—	—	—	—	—	140	735	540
—	—	—	—	—	—	160	860	633
8,5	82,5	1 530	1 490	5,2	5	200	1 035	762
11	83	1 530	1 490	6,6	6,4	240	1 275	940
16	85,5	1 485	1 440	9,6	9,1	300	1 760	1 300
25	87,5	1 485	1 445	15,5	14	450	2 250	1 650
29	88	1 485	1 445	17,5	16	500	2 500	1 840
34	89	1 485	1 450	21	18,5	650	3 300	2 430
42	89,5	1 485	1 450	26	23	725	3 600	2 650
54	90	1 485	1 450	33	29	800	3 900	2 970
68	91	1 485	1 455	42	37	1 175	5 500	4 050
85	91	1 485	1 455	52	46	1 275	6 100	4 500
106	91	1 485	1 455	64	57	1 375	6 700	4 930
136	92	1 485	1 465	83	73	1 900	8 500	6 250
170	92,5	1 485	1 465	103	90	2 100	9 500	7 000
212	93,5	1 485	1 465	128	113	2 300	10 500	7 750
—	—	—	—	—	—	140	735	540
—	—	—	—	—	—	160	860	635
—	—	—	—	—	—	200	1 035	760
—	—	—	—	—	—	240	1 275	940
12,5	83,5	—	—	8	7,3	300	1 760	1 300
18,5	85,5	—	955	11,5	10,4	450	2 250	1 650
22,5	86	—	—	14	12,5	500	2 500	1 840
27	87,5	—	—	17	15	650	3 300	2 430
34	88	990	960	21	18,7	725	3 600	2 650
42	89	—	—	25	22,8	800	3 900	2 970
55	89,5	—	—	34	30	1 175	5 500	4 050
68	90	—	965	42	37	1 275	6 100	4 500
85	91	—	—	52	46	1 375	6 700	4 930
106	91,5	—	—	65	57	1 900	8 500	6 250
136	92	—	970	83	73	2 100	9 500	7 000
170	92,5	—	975	103	91	2 300	10 500	7 750
—	—	—	—	—	—	240	1 275	940
—	—	—	—	—	—	300	1 760	1 300
—	—	—	—	—	—	450	2 250	1 650
—	—	—	—	—	—	500	2 500	1 840
31	85,5	—	715	14	12	650	3 300	2 430
25	86,5	—	715	15,5	14,2	725	3 600	2 650
31	87	—	720	20,5	17,4	800	3 900	2 970
42	88	—	720	27	23	1 175	5 500	4 050
55	89,5	745	725	35	30	1 275	6 100	4 500
68	90	—	725	43	37	1 375	6 700	4 930
85	91	—	730	52	46	1 900	8 500	6 250
106	91,5	—	730	64	57	2 100	9 500	7 000
135	92	—	730	83	72,5	2 300	10 500	7 750

В отношении компенсации двигатели Саксенверк строятся в двух вариантах. Мелкие мощности до типа КД-63 выполняются таким



Фиг. 555.

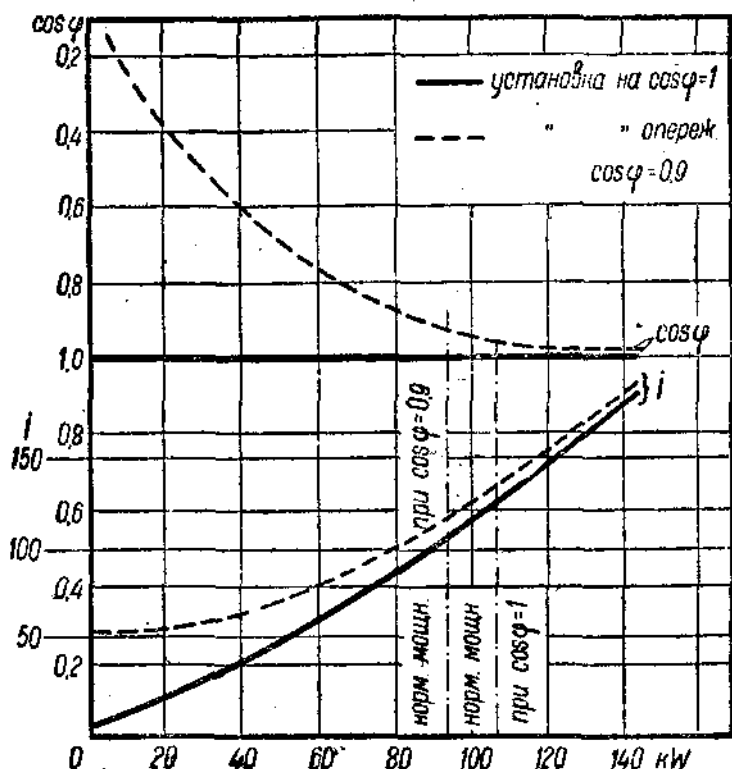


Фиг. 556.

образом, что их $\cos \varphi$ равен практически единице при всех нагрузках до холостого хода включительно. На фиг. 556 даны характеристики двигателя на 7,5 kW. Для сравнения пунктиром приведены характеристики нормального асинхронного двигателя той же мощности. Перестановкой щеток можно до-

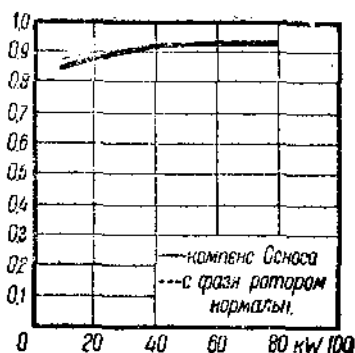
стичь работы с опережающим $\cos \varphi = 0,9$ при полной нагрузке. В последнем случае опережающая безваттная мощность двигателя увеличивается по мере уменьшения нагрузки. Установка щеток на опережающий $\cos \varphi = 0,9$ ведет к понижению к. п. д. двигателя.

Двигатели типа KD-73 и выше выполняются также на $\cos \varphi = 1$ и 0,9 (опережающий) при полной нагрузке, но, в отличие от



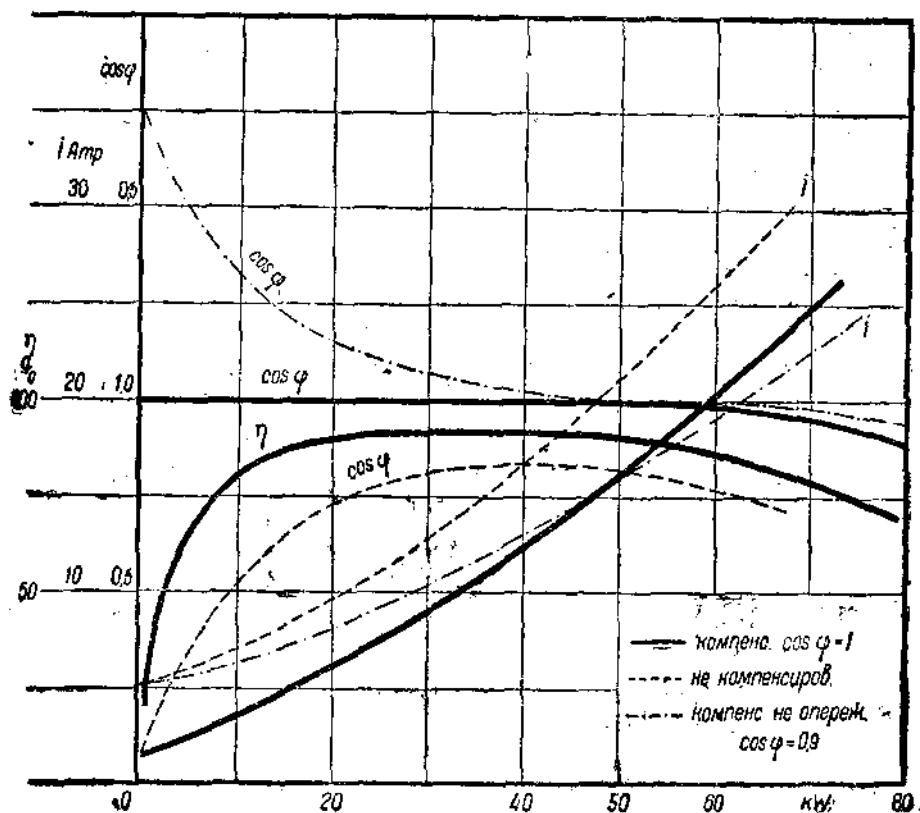
Фиг. 557.

первых, безваттная мощность их не остается постоянной при малых нагрузках, а возрастает, доходя при холостой работе до 20—25% ваттной мощности при полной нагрузке. В случае установки на опережающий $\cos \varphi = 0.9$ безваттная мощность холостого хода примерно в два раза больше, чем при установке на $\cos \varphi = 1$. При работе с $\cos \varphi = 0.9$ потери в двигателе увеличиваются настолько, что его нормальная мощность понижается на 15—20%. Характеристики двигателя 100/95 kW (KD-103) 1000 об/мин приведены на фиг. 557. Установка на опережающий $\cos \varphi = 0.9$ позволяет производить улучшение $\cos \varphi$ сети за счет компенсированного двигателя, конечно, в мере, соответствующей его мощности.



Фиг. 558.

Сравнивая компенсированные двигатели с нормальными асинхронными в отношении экономичности работы, можно сделать следующее заключение: так как сила тока, потребляемая двигателем, обратно пропорциональна его $\cos \varphi$, то ясно, что компенсированный двигатель, какой бы конструкции он ни был, требует меньшей силы тока. Коэффициент полезного действия компенсированных и нормальных асинхронных двигателей практически один и тот же (фиг. 558), по крайней мере мощностью до 20 kW. Кривые фиг. 558 построены на основании каталогов Саксенверк (Liste D-6 и D-10, 1929 г.).



Фиг. 559.

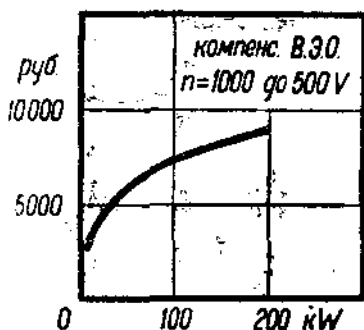
Для малых мощностей 10—15 kW замечается некоторое ухудшение к. п. д. компенсированных двигателей примерно на 1%, что практического значения иметь не может, так как увеличение расхода энергии окупается общей разгрузкой сети от безваттного тока.

По отзывам германских заводов компенсированные двигатели, особенно типа Осноса, представляют собой надежную машину, вполне оправдавшую себя на практике, и наличие коллектора не нарушает ценных качеств асинхронного двигателя в отношении простоты и надежности. Действительность, однако, показывает несколько иную картину. Электротехнические фирмы свертывают производство мелких двигателей, продолжая развивать, главным

образом, более крупные от 40 kW и выше. Опыт с маломощными двигателями, поставленный обществом „Berliner Elektrizitätswerke“, не оправдал возлагавшихся на эти двигатели надежд. Правда, с тех пор в конструкции этих двигателей достигнуты усовершенствования, но все же большого распространения этих двигателей в Германии не наблюдается. В частности крупным недостатком компенсированного двигателя фирмы Саксенверк является то обстоятельство, что при повреждении в компенсационной части он вообще выбывает из строя, что может быть очень желательно для электрических станций, но едва ли приемлемо для промышленных предприятий.

Необходимость подводки тока в двигателях Осноса к кольцам исключает возможность изготовления их на высокое напряжение. Предельным напряжением по данным фирмы Саксенверк является 500 V. При более высоких напряжениях приходится прибегать к промежуточному трансформатору, что удорожает установку.

Зав. „Электросила“ выработал свой тип компенсированного двигателя системы инж. Лютера и Костенко, в котором недостатки двигателя Осноса в смысле питания со стороны ротора и двигателя Гейланда в отношении коммутации устранены. Благодаря специальной конструкции так называемого обращенного коллектора (см. „Электричество“, 1926, № 1, стр. 12) удалось изготовить двигатель с компенсирующей обмоткой, расположенной на статоре, на высокое напряжение с удовлетворительной коммутацией. На фиг. 559 приведены кривые двигателя 50 kW, 750 об/мин, 2000 V, построенного заводом „Электросила“ по заданию Грознефти. К сожалению, в настоящее время этот тип не изготавливается. Стоимость же обычного двигателя Осноса завода „Электросила“ на 1000 об/мин до напряжения 500 V приведена в виде кривой на фиг. 560.



Фиг. 560.

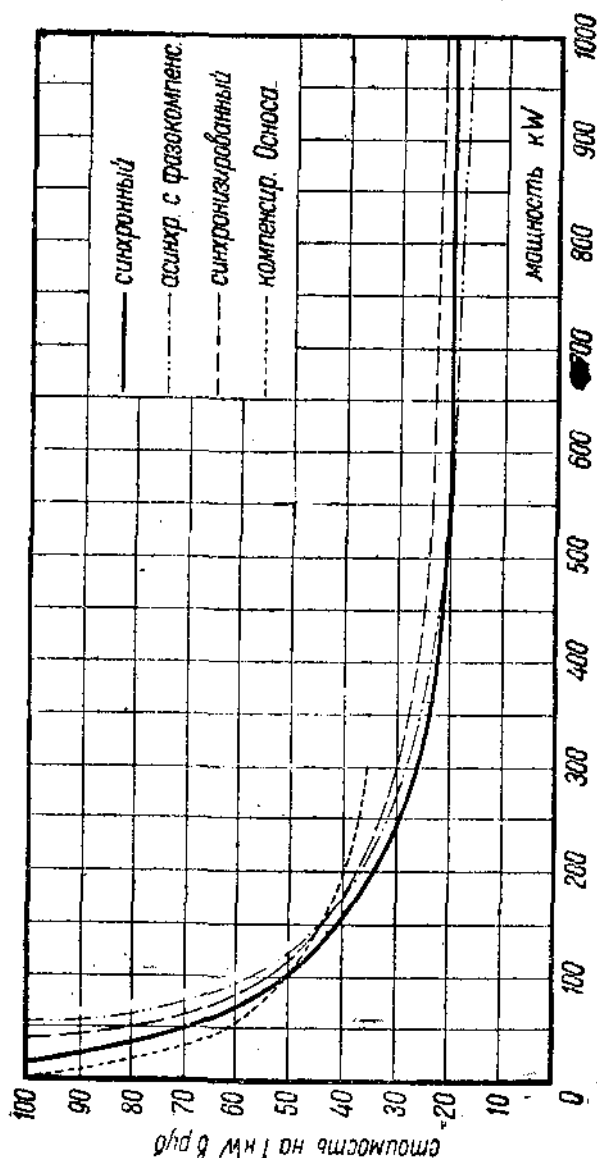
§ 11. Сравнение различных способов компенсации.

Рассмотрев ряд мер улучшения коэффициента мощности, подведем итоги для облегчения выбора.

1) В случае проектирования электрического оборудования заново задача чрезвычайно упрощается тем, что проектирующий не связан существующим оборудованием и должен быть лишь достаточно осведомлен обо всех современных возможностях компенсации в целях правильного подбора двигателей по типу и мощности. Однако последний способ улучшения $\cos \varphi$ только за счет увеличения степени загрузки двигателей не позволяет достигнуть значений $\cos \varphi$, близких к единице, тем более, что при широко развитом одиночном приводе часть двигателей всегда будет работать с недогрузкой в силу производственных условий.

Применение способа переключения обмоток двигателя со звезды на треугольник также не решает полностью вопроса.

Таким образом в случае заново оборудуемого предприятия приходится, помимо тщательного выбора электродвигателя по мощ-



Фиг. 561.

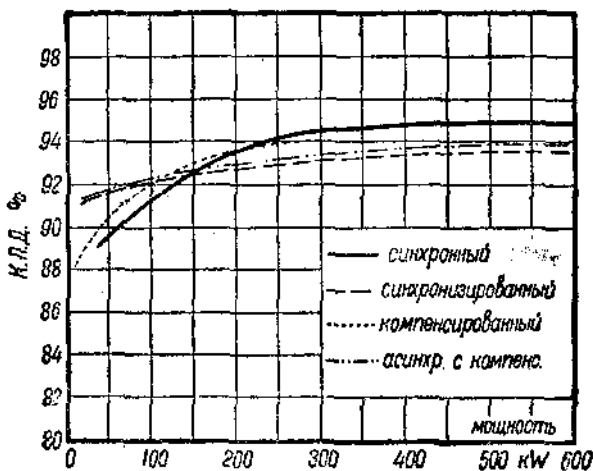
ности, прибегать к искусственному повышению $\cos \phi$, для чего использовать одно из средств, описанных в предыдущих параграфах.

Дополнять вновь оборудуемые заводские установки машинами безваттной мощности следует только в том случае, когда пред-

приятие оборудовано мелкими двигателями. В предприятиях же с электродвигателями крупных мощностей следует останавливаться на применении „двигателей высокого $\cos \varphi$ “, так как в этом случае первоначальные затраты оказываются относительно гораздо ниже; эффект же в отношении повышения коэффициента мощности получается в обоих случаях одинаковый.

Как правило, проверенное на практике иностранных заводов, следует настоятельно рекомендовать применение асинхронных двигателей с фазокомпенсаторами и синхронных двигателей, достигших высокой степени совершенства и оставивших позади себя в экономическом отношении синхронизированные и компенсированные двигатели. На фиг. 561 приведены сравнительные кривые стоимостей указанных типов двигателей для 1000 об/мин.

Из кривых вытекает преимущество синхронных и компенсированных двигателей перед другими до мощности около 120 kW. При больших мощностях преимущество остается за двигателями синхронными и асинхронными с фазокомпенсатором. В отношении к. п. д. синхронные и компенсированные двигатели уступают двум другим только при небольших мощностях. После 200 kW к. п. д. всех четырех типов отличается на 0,5—1% один от другого (фиг. 562), причем впереди всех идет синхронный двигатель.



Фиг. 562.

ТАБЛИЦА 194.

Мощность kW	Число об/мин	Число периодов	Занимаемая площадь в m^2	
			Синхронный двигатель	Асинхронный двигатель
6 620	107	25	$5 \times 7,5 = 37,5$	$6,1 \times 7,6 = 46,3$
4 800	187	25	$5,31 \times 4,75 = 25,1$	$5,05 \times 5,85 = 29,5$
3 680	100	60	$4 \times 6,42 = 25,7$	$5,07 \times 7,26 = 36,8$
3 680	240	60	$4,15 \times 4,32 = 18,0$	$4,25 \times 4,86 = 20,6$
3 680	83	25	$4,32 \times 6,05 = 26,1$	$4,56 \times 6,08 = 27,8$
1 105	300	25	$3,3 \times 3,54 = 11,7$	$3,72 \times 3,58 = 13,3$

Помимо экономических преимуществ синхронный двигатель обладает меньшими размерами, что дает выигрыш при монтаже.

В табл. 194 приведены сравнительные размеры американских синхронных и асинхронных прокатных двигателей на различные мощности и числа оборотов, из которых видно, что необходимая для синхронных двигателей площадь меньше, чем для такого же асинхронного, на 7—40%. *) (О других преимуществах см. стр. 425).

При рассмотрении способов компенсации для вновь проектируемых предприятий предполагалось исключительное применение трехфазного тока. Вопрос о выборе рода тока решается первым и предпрещает вопрос о $\cos \varphi$.

Во всяком случае даже частичная электрификация постоянным током ставит проблему $\cos \varphi$ в другие рамки, и разрешение ее становится несравненно легче. Помимо идеального ее разрешения для цехов, оборудованных постоянным током, где, как было образно сказано в предыдущей главе, " $\cos \varphi = 1$ доводится до самого приемника энергии", наличие крупных преобразователей тока дает готовое решение централизованной компенсации $\cos \varphi$ для остальных цехов.

2) В отношении увеличения $\cos \varphi$ существующих установок вопрос решается сложнее. Местное исправление $\cos \varphi$ перегруппировкой существующих двигателей обычно не дает крупных результатов. Здесь, как и при новом оборудовании, приходится обращаться либо к помощи машин безваттной мощности, либо к замене части работающих асинхронных двигателей двигателями высокого $\cos \varphi$. Выгодность того или другого обуславливается как характером электрического оборудования завода, так и экономическим сравнением: а) единовременных затрат на компенсирующее оборудование; процентов на капитал и погашение и годовых расходов по эксплуатации; б) годовой экономии на стоимости энергии при повышении $\cos \varphi$.

Обозначим через:

$\cos \varphi_1$ — коэффициент мощности до исправления;

$\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности после установки фазокомпенсатора;

K — стоимость компенсирующего устройства в руб.;

P_p — мощность, потребляемая установкой в kW;

h — число часов работы установки;

P_{kw} — мощность, потребляемая компенсатором;

b — стоимость 1 kWh энергии при $\cos \varphi = 0,8$ (обычно принимаемая за нормальную);

Δb_1 — увеличение стоимости 1 kWh при $\cos \varphi < 0,8$;

Δb_2 — уменьшение стоимости 1 kWh при $\cos \varphi > 0,8$.

Косвенные расходы по установке какой-либо системы фазокомпенсатора должны быть приняты по инструкции ВСНХ в 15% стоимости установки, т. е. $0,15 \cdot K$.

Стоимость энергии при $\cos \varphi_1 < 0,8$:

$$P_p \cdot h \cdot b \left(1 + \frac{\Delta b_1}{100} \right) \text{ руб. в год.}$$

*) „Journal of the Am. Inst. of El. Eng.", 1923, № 2, стр. 136. Berkshire and Minne Synchronous Motors for Driving Steel Rolling Mills.

Стоимость энергии при $\cos \varphi_2 > 0,8$:

$$(P_w + P_{kw}) \cdot h \cdot b \left(1 - \frac{\Delta b_2}{100} \right) \text{ руб. в год.}$$

Выгодность компенсации определится неравенством:

$$0,15 K + (P_w + P_{kw}) h \cdot b \left(1 - \frac{\Delta b_2}{100} \right) < P_w \cdot h \cdot b \left(1 + \frac{\Delta b_1}{100} \right).$$

Как видно, она будет тем больше, чем выше стоимость энергии b и больше рабочее время h .

В случае замены существующих двигателей при исчислении годовых расходов необходимо учитывать суммы, полученные от реализации замененных двигателей.

а) В отношении заводов с крупными двигателями возможны три положения:

1. Замена одного или нескольких асинхронных двигателей синхронными.

2. Дополнение существующих асинхронных двигателей фазокомпенсаторами.

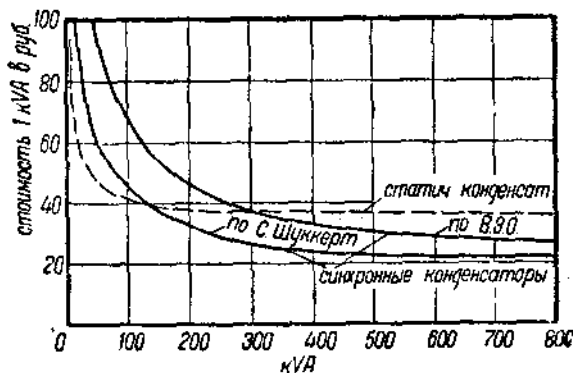
3. Установка синхронного конденсатора.

Синхронизированных и компенсированных асинхронных двигателей, как уступающих синхронным экономически и технически, следует избегать.

Что касается статических конденсаторов, то при больших мощностях они не могут конкурировать с синхронными, несмотря на их высокие эксплуатационные качества, так как стоимость их на единицу мощности остается почти постоянной, тогда как для синхронных конденсаторов она резко падает (фиг. 563).

Учитывая высокую отдачу статических конденсаторов, можно установить путем подсчета, что наиболее выгодная мощность, до которой они могут конкурировать с синхронными конденсаторами, лежит в пределах 250—400 kVA, в зависимости от числа часов работы установки.

б) Иные условия представляют небольшие заводы, также хотя и крупные по мощности, но оборудованные мелкими двигателями (примерно до 50 kW). Типичным примером таких заводов могут служить машиностроительные мастерские со станками по холодной



Фиг. 563.

обработке металлов.*) В этих случаях замена работающих двигателей оказалась бы неэкономичной (фиг. 561 и 562). По той же причине нерационально и дополнение асинхронных двигателей фазокомпенсаторами.

Итак, единственно возможными методами увеличения $\cos \varphi$ в данном случае оборудования мелкими двигателями будут:

1. замена части двигателей компенсированными,
2. установка синхронного или статического конденсатора на входе предприятия.

Обычно второй метод оказывается более радикальным.

Поясним сказанное о выборе способа компенсации на примере.

Пример. Электрифицированное предприятие с установленной в двигателях мощностью 6400 kW потребляет 2360 kW при $\cos \varphi = 0,72$ и питается от трансформаторной подстанции, состоящей из четырех трансформаторов по 1000 kVA каждый. Работа производится в течение 4800 час. в году. Годовой расход энергии составляет 12 100 000 kWh. Среди установок завода имеются один мотор-генератор, работающий как преобразователь, с приводом от асинхронного двигателя мощностью 600 kW при 970 об/мин, и один компрессор с приводом от асинхронного двигателя 440 kW при 965 об/мин. Оба двигателя работают непрерывно в течение рабочего дня.

Наивыгоднейший $\cos \varphi$ будет зависеть прежде всего от способа оплаты электрической энергии. Если принять двойной тариф, то предел увеличения $\cos \varphi$ определяется общей мощностью трансформаторной подстанции, исходя из которой устанавливают основную часть тарифа. Снижение последней зависит всецело от того, позволит ли повышение $\cos \varphi$ уменьшить установленную на подстанции мощность. В случае тарификации электрической энергии только по количеству израсходованной энергии с предоставлением премии за повышенный $\cos \varphi$ и начислением штрафа за низкий $\cos \varphi$ выгодность увеличения коэффициента мощности определяется сравнением ежегодных расходов для нескольких вариантов.

Обращаясь к приведенным цифрам, можно констатировать, что в случае двойного тарифа единственно рациональной мерой будет доведение $\cos \varphi$ до значения $\cong 0,8$, при котором полная мощность, потребляемая заводом, будет

$$\frac{2360}{0,80} = 2950 \text{ kVA.}$$

В этом случае оборудование подстанции может быть уменьшено на один трансформатор. Оставшиеся три будут работать с коэффициентом загрузки

$$\eta_B = \frac{2950}{3000} = 0,98.$$

*) Здесь не идет речь об улучшении $\cos \varphi$ путем частичной электрификации регулируемых станков постоянным током, так как для перевода существующего электрического оборудования с трехфазного тока на постоянный должны быть более существенные причины в виде рационализации использования станков или кранов и тому подобные производственные факторы. Идеальное разрешение проблемы $\cos \varphi$ является лишь одним из второстепенных благоприятствующих постоянному току условий.

Увеличение $\cos \varphi$ выше 0,8 экономически не оправдывается, так как не дает возможности еще более понизить мощность подстанции и тем самым уменьшить годовую стоимость энергии.

В случае расчета между предприятием и электрической станцией только по израсходованной энергии необходимо будет сравнить ряд вариантов. В дальнейшем рассмотрим только второй способ оплаты — по количеству энергии, из которого можно будет сделать непосредственные выводы и для случая двойного тарифа. Остановимся на следующих четырех значениях $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi = 0,8; \cos \varphi = 0,9; \cos \varphi = 0,96; \cos \varphi = 1,0,$$

причем проведем подсчет для трех мероприятий:

- 1) установки синхронного конденсатора;
- 2) замены крупных асинхронных двигателей синхронными;
- 3) установки к существующим асинхронным двигателям фазокомпенсаторов.

1. Синхронный конденсатор. Мощности синхронных конденсаторов для четырех указанных случаев будут равны (с округлением до стандартных):

$$\cos \varphi = 0,8; P_k = P_n (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1) = 2360 (0,96 - 0,73) = 540 \text{ kVA} \cong 600 \text{ kVA}.$$

$$\cos \varphi = 0,9; P_k = 2360 (0,96 - 0,48) = 1130 \text{ kVA} \cong 1200 \text{ kVA}.$$

$$\cos \varphi = 0,96; P_k = 2360 (0,96 - 0,32) = 1500 \text{ kVA} \cong 1500 \text{ kVA}.$$

$$\cos \varphi = 1,0; P_k = 2360 (0,96 - 0) = 2270 \text{ kVA} \cong 2300 \text{ kVA}.$$

По кривой 2 фиг. 518 стоимость синхронных конденсаторов будет:

при $\cos \varphi = 0,8$	16 800 руб.
„ $\cos \varphi = 0,9$	28 900 „
„ $\cos \varphi = 0,96$	35 300 „
„ $\cos \varphi = 1,0$	53 000 „

Учитывая монтаж в 15% от стоимости оборудования, а годовые отчисления в 15% от полной стоимости установки, получим косвенные расходы в рублях в год:

при $\cos \varphi = 0,8$	2 900 руб.
„ $\cos \varphi = 0,9$	5 000 „
„ $\cos \varphi = 0,96$	6 100 „
„ $\cos \varphi = 1,0$	9 200 „

Мощность на вращение синхронных конденсаторов по кривой фиг. 517:

при $\cos \varphi = 0,8$	$600 \cdot 0,056 = 31,5 \text{ kW}$
„ $\cos \varphi = 0,9$	$1200 \cdot 0,047 = 56,3 \text{ „}$
„ $\cos \varphi = 0,96$	$1500 \cdot 0,045 = 67,5 \text{ „}$
„ $\cos \varphi = 1,0$	$2300 \cdot 0,044 = 102,0 \text{ „}$

Годовой расход электрической энергии, идущей на вращение синхронных конденсаторов:

при $\cos \varphi = 0,8$	$4800 \cdot 31,5 = 151\,500 \text{ kWh}$
„ $\cos \varphi = 0,9$	$4800 \cdot 56,3 = 272\,000 \text{ „}$
„ $\cos \varphi = 0,96$	$4800 \cdot 67,5 = 325\,000 \text{ „}$
„ $\cos \varphi = 1,0$	$4800 \cdot 102 = 480\,000 \text{ „}$

Для сравнения ежегодных расходов ниже определены повышения и понижения основной стоимости электрической энергии в зависимости от $\cos \varphi$. Для определения процента изменения по табл. 161 получаем:

для $\cos \varphi = 0,72$	надбавка 6%
" $\cos \varphi = 0,8$	" 0
" $\cos \varphi = 0,9$	скидка 5%
" $\cos \varphi = 0,96$	" 9%
" $\cos \varphi = 1,0$	" 9%

Ниже, в табл. 195, приведены результаты всех дальнейших подсчетов для четырех значений $\cos \varphi$, из которых видно, что выгода увеличения $\cos \varphi$ резко выявляется при более высокой стоимости электрической энергии. Увеличение $\cos \varphi$ сверх 0,96 явно невыгодно.

ТАБЛИЦА 195.

Стоимость 1 kWh при $\cos \varphi = 0,8$ коп.	Стоимость 1 kWh при других $\cos \varphi$ коп.				Расход электрической энергии в kWh с учетом расхода ее на синхронные конденсаторы при				
	0,72	0,9	0,96	1,0	$\cos \varphi = 0,72$	$\cos \varphi = 0,80$	$\cos \varphi = 0,90$	$\cos \varphi = 0,96$	$\cos \varphi = 1,0$
2,0	2,12	1,9	1,82	1,82					
3,0	3,18	2,85	2,73	2,73					
5,0	5,3	4,75	4,55	4,55	12 100 000	12 251 500	12 372 000	12 425 000	12 580 000
7,5	7,96	7,12	6,84	6,84					
10,0	10,6	9,5	9,10	9,10					

Продолжение

Стоимость электрической энергии в год в рублях при

$\cos \varphi = 0,72$	$\cos \varphi = 0,80$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 0,96$	$\cos \varphi = 1,0$
256 000	245 000	235 000	228 000	238 000
385 000	367 500	352 000	340 500	344 000
640 000	611 000	587 000	565 000	573 000
965 000	920 000	879 000	850 000	860 000
1 280 000	1 225 000	1 175 000	1 130 000	1 141 000

Продолжение

Суммарные ежегодные расходы в рублях при

$\cos \varphi = 0,72$	$\cos \varphi = 0,80$	$\cos \varphi = 0,90$	$\cos \varphi = 0,96$	$\cos \varphi = 1,0$
256 000	247 000	240 000	234 100	237 200
385 000	370 000	357 000	346 600	353 200
640 000	613 000	592 000	571 100	582 200
965 000	922 000	884 000	856 100	869 200
1 280 000	1 228 000	1 180 000	1 136 100	1 153 200

Наивыгоднейший результат получается при $\cos \varphi = 0,96$ и при тарифе 10 коп./kWh. Экономия равна 11%.

При двойном тарифе, как уже указывалось, наивыгоднейший $\cos \varphi$ определился в 0,8, при котором мощность подстанции понижается на 1000 kW, что дает (для примера „Электроток“ в Ленинграде) годовую экономию в

$$1000 \cdot 36 \cdot 12 = 432\,000 \text{ руб.}$$

при одновременных затратах на установку синхронного конденсатора в 16 800 руб. и добавочном расходе энергии в 151 000 kWh. Стоимость 1 kWh при двойном тарифе „Электроток“ обходится в 2,1 коп. Таким образом годовая эксплуатация синхронного конденсатора обойдется в

$$2,1 \cdot 151\,000 \cdot 10^{-2} \cong 3\,170 \text{ руб.}$$

2. Синхронный двигатель. Для увеличения $\cos \varphi$ завода производится замена асинхронных двигателей компрессора и мотор-генератора синхронными.

Из произведенных испытаний обоих двигателей получены следующие данные:

	Компрессор	Мотор-генератор
Потребляемая мощность	500 kW	540 kW
$\cos \varphi$	0,89	0,90

Безваттная мощность обоих двигателей:

$$P_{bi} = \Sigma(P_w \cdot \operatorname{tg} \varphi) = 250 + 255 = 505 \text{ kVA.}$$

Суммарная ваттная мощность равна 1040 kW.

Следовательно, работа обоих заменяемых двигателей происходит со сдвигом фаз, определяемым:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{505}{1040} = 0,485 \text{ или } \cos \varphi \cong 0,9.$$

Найдем $\cos \varphi$ установки без этих двух двигателей.

Ваттная составляющая установки = 2360 — 1040 = 1320 kW.

Суммарная безваттная (включая 2 заменяемых двигателя) = 2260 kVA.

Безваттная составляющая установки без двух двигателей = 2260 — 505 = 1765 kVA, что дает:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1765}{1320} = 1,34 \text{ или } \cos \varphi = 0,60.$$

Для увеличения $\cos \varphi_1$ до значения 0,80 необходимо иметь в сети безваттную мощность:

$$2260 \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 = 2260 \cdot 0,73 = 1720 \text{ kVA.}$$

Эта мощность будет делиться между синхронными и асинхронными двигателями следующим образом:

Синхронные двигатели . . $P_w = 1040 \text{ kW}$; $P_{bi} = 45 \text{ kVA}$ (опережение).

Асинхронные двигатели . . $P_w = 1320 \text{ kW}$; $P_{bi} = 1765 \text{ kVA}$.

Оба синхронных двигателя должны будут работать с $\cos \varphi_1$, который найдется из:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{45}{1040} = 0,043 \text{ или } \cos \varphi = 0,999,$$

т. е. практически $\cos \varphi$ обоих двигателей должен быть равен 1. Их мощность выбираем соответственно нагрузке, определившейся по испытанию:

для компрессора 500 kW

„ мотор-генератора . . 540 „

Аналогичным расчетом легко установить, что для дальнейшего увеличения общезаводского коэффициента мощности необходимы будут следующие мощности синхронных двигателей:

а) $\cos \varphi = 0,90$. Суммарная безваттная мощность равна 1070 kVA.

Синхронные двигатели должны дать 685 kVA, т. е. работать с $\cos \varphi = 0,83$ (опережающим).

Распределяя эту мощность примерно так, чтобы оба двигателя работали с одинаковым $\cos \varphi$, получим:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Компрессор . . . } P_w = 500 \text{ kW}; P_{bi} = 300 \text{ kVA} \\ \quad \quad \quad \operatorname{tg} \varphi = 0,6 \quad \quad \cos \varphi = 0,85 \\ \text{Мотор-генератор . } P_w = 540 \text{ kW}; P_{bi} = 385 \text{ kVA} \\ \quad \quad \quad \operatorname{tg} \varphi = 0,71 \quad \quad \cos \varphi = 0,81 \end{array} \right\} \text{ (опережение)}$$

Для такой работы потребуются двигатели:

для компрессора $\sqrt{500^2 + 300^2} = 580 \text{ kVA}$, берем 600 kVA

„ мотор-генератора $\sqrt{540^2 + 385^2} = 660 \text{ kVA}$, „ 650 „

б) $\cos \varphi = 0,95$. Суммарная безваттная мощность равна 755 kVA.

Синхронные двигатели будут работать с опережающим $\cos \varphi = 0,70$.

Распределение мощностей выбираем:

Компрессор . . $P_w = 500 \text{ kW}; P_{bi} = 355 \text{ kVA}; \operatorname{tg} \varphi = 0,72; \cos \varphi = 0,80$.

Мотор-генер. . $P_w = 540 \text{ kW}; P_{bi} = 400 \text{ kVA}; \operatorname{tg} \varphi = 0,72; \cos \varphi = 0,81$.

Мощность двигателей:

Компрессор . . . $\sqrt{500^2 + 355^2} = 615 \text{ kVA}$, берем 600 kVA.

Мотор-генератор . $\sqrt{540^2 + 400^2} = 675 \text{ kVA}$, „ 700 kVA.

с) $\cos \varphi = 1,0$. Суммарная безваттная мощность равна 0. Все 1765 kVA должны покрываться синхронными двигателями, для чего последние должны работать с опережающим $\cos \varphi = 0,5$.

Компрессор . . $P_w = 500 \text{ kW}; P_{bi} = 865 \text{ kVA}; \operatorname{tg} \varphi = 1,72; \cos \varphi = 0,5$.

Мотор-генератор $P_w = 540 \text{ kW}; P_{bi} = 900 \text{ kVA}; \operatorname{tg} \varphi = 1,67; \cos \varphi = 0,5$.

Мощность двигателей:

Компрессор . . . $\sqrt{500^2 + 865^2} = 1000 \text{ kVA}$, берем 1000 kVA.

Мотор-генератор . $\sqrt{540^2 + 900^2} = 1060 \text{ kVA}$, „ 1100 kVA.

Стоимость синхронных двигателей определится для различных случаев по кривой фиг. 561, откуда имеем:

для работы с общим	$\cos \varphi = 0,8$	24 200 руб.
" "	$\cos \varphi = 0,9$	28 800 "
" "	$\cos \varphi = 0,96$	29 400 "
" "	$\cos \varphi = 1,0$	46 000 "

Учитывая, как и в первом случае, монтаж в 15% от стоимости двигателей и годовые отчисления в 15% стоимости установки, получим косвенные расходы при:

$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 0,96$	$\cos \varphi = 1,0$
4 200 руб.	4 950 руб.	5 100 руб.	7 950 руб.

Потери в синхронных двигателях в пределах от 400 kW и выше можно принять одинаковыми для всех двигателей и равными 5%. Тогда годовой расход энергии определится:

для $\cos \varphi = 0,8$	950 · 0,05 · 4 800 = 227 000 kWh
" $\cos \varphi = 0,9$	1 250 · 0,05 · 4 800 = 300 000 "
" $\cos \varphi = 0,96$	1 300 · 0,05 · 4 800 = 312 000 "
" $\cos \varphi = 1,0$	2 100 · 0,05 · 4 800 = 504 000 "

Все прочие расходы, необходимые для сравнения, приведены в табл. 196.

ТАБЛИЦА 196.

Полный расход энергии в kWh				
$\cos \varphi = 0,72$	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,90$	$\cos \varphi = 0,96$	$\cos \varphi = 1,0$
12 100 000	12 327 000	12 400 000	12 412 000	12 604 000

Стоимость энергии в год в рублях при основной цене 2; 3; 5; 7,5 и 10 коп/kWh

2 коп.	256 000	246 500	235 000	226 500	230 000
3 "	385 000	370 000	354 000	340 000	344 000
5 "	640 000	617 000	590 000	565 000	573 000
7,5 "	965 000	925 000	880 000	850 000	860 000
10 "	1 280 000	1 232 700	1 180 000	1 130 000	1 150 000

Полные годовые расходы в рублях

2 коп.	256 000	250 700	239 950	231 100	237 950
3 "	385 000	374 200	358 950	345 100	351 950
5 "	640 000	621 200	594 950	570 100	658 950
7,5 "	965 000	929 200	834 950	855 100	867 950
10 "	1 280 000	1 236 900	1 184 950	1 135 100	1 157 950

Результат почти тот же, что и при установке синхронных конденсаторов. Наивыгоднейший $\cos \varphi = 0,96$. Увеличение $\cos \varphi$ до единицы явно невыгодно.

Сравнивая этот способ с предыдущим, видим, что для улучшения $\cos \varphi$ до 0,8 следует отдать предпочтение синхронному конденсатору. Для увеличения до 0,9 выгодность колеблется то в сторону конденсатора, то в сторону двигателя; сверх 0,90 выгоднее оказывается замена существующих асинхронных двигателей синхронными.

3. Установка фазокомпенсаторов. Остановимся на фазокомпенсаторах типа Леблана-Шербиуса, хотя компенсатор с независимым возбуждением мог бы дать $\cos \varphi = 0,99$ опережающий, машина же Леблана дает только $\cos \varphi = 1$, но зато не требует непосредственного соединения с двигателем, усложняющего и удорожающего установку.

По методу AEG [уравнение (362)] мощность фазокомпенсаторов получается равной:
для компрессора:

$$P_k = 0,9 \cdot 440 \cdot 0,035 = 14 \text{ kVA},$$

для мотор-генератора:

$$P_k = 0,9 \cdot 600 \cdot 0,03 = 16 \text{ kVA};$$

берем оба по 17 kVA, руководясь шкалой завода „Электросила“. Стоимость обоих 7800 руб.

Дополнительный расход энергии за год:

$$7 \cdot 4800 = 33 \cdot 600 \text{ kWh.}$$

Из рассмотрения варианта п. 2 выяснилось, что при работе обоих двигателей с $\cos \varphi = 1$ общезаводский $\cos \varphi$ будет не выше 0,80. Таким образом метод фазокомпенсатора пригоден только для компенсации в небольших пределах, и из всех разобранных выше для того же значения $\cos \varphi = 0,8$ — он самый дешевый. Этот способ увеличения $\cos \varphi$ был бы чрезвычайно экономичен в условиях двойного тарифа, где как раз требуется увеличение $\cos \varphi$ завода до величины 0,80.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

Отдел А.

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ПОДЪЕМНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК.

Краны.

- Andrée, Bremskräfte bei Kranen, „Fördertechnik“, 1911, стр. 61. — Работа кранов и сопротивления при движении.
- Becker, Neues Verfahren zum Regeln der Senkgeschwindigkeit von Lasten, „Förd.“, 1910, стр. 97. — Описание схем, допускающих плавный спуск тяжелых грузов на постоянном токе.
- Broughton, Ward-Leonard Control Applied to Heavy Cranes, „Electr.“, 1920, № 2208. — Электрическое оборудование пловучего крана на 250 тонн для Панамского канала. Схема дана в мелком масштабе и неясна.
- „Electr.“, 1919, стр. 142, 168, 192. — Портовое оборудование, выбор двигателя и способы управления.
- Eastwood, „J. A. I. E. E.“, 1922, № 4. — Вспомогательные электромеханизмы для кранов. Тормоза, ограничители.
- Eilert, Der Kraftbedarf von elektrischen u. hydraulischen Hebezeugen, „V. D. I.“, 1912, стр. 1061. — Сравнение работы двух кранов на гидравлическом и электрическом приводе.
- „Electrician“, 1917, 14/XII. — Весь номер посвящен описанию электрических кранов и подъемников. Схемы, диаграммы работы и сравнения.
- Erzgräber, Ermittlung des Verhaltens der Hubmotore elektrischer Krane bei verschiedener Belastung, „D. p. J.“, 1910, стр. 325 и 536. — Сравнение различных двигателей с точки зрения режима работы кранов.
- Franzilet, Elektrische Giessereikrane, „E. K. B.“, 1910, стр. 419. — Описание и работа мостового крана в литейных.
- Fürgen, Berechnung des Schwenkwiderstandes der Drehkrane mit Rollenlagern, „V. D. I.“, 1914, стр. 38 и 358. — Расчет мощности для поворотных кранов, установленных на шариковых подшипниках.
- Gettert, Wahl der Stromart für Hebezeuge, „E. T. Z.“, 1924, № 16. — Сравнение на примерах постоянного, однофазного и трехфазного тока.
- Häpchen, Elektrische Kранаустройства, „Helios“, 1923, № 10, 11, 12. — Описание различных систем кранов, аппаратуры и схем.
- Hermanus, Fortschritte im Bau von Hebezeugen für Hand und el. Antrieb, „Förd.“, 1911, стр. 92, 111, 135. — Описание различных систем кранов и подъемных механизмов.
- Antrieb von Kranen durch Gleich- und Wechselstrom, „Förd.“ — Описание и сравнение систем кранов на постоянном и трехфазном токе.
- Jackson, Selection of Electrical Apparatur for cranes, „G. El. R.“, 1916, стр. 506. — Описание кранов и схем.
- Kadnozka, Die Berechnung der Widerstände bei Senkbremsschaltungen, „E. K. B.“, 1917, стр. 29, 51, 69. — Подробный аналитический расчет сопротивлений для всевозможных случаев торможения серийно-двигателя при опускании грузов.
- Keller, Eine neue Senkbremsschaltung, „E. T. Z.“, 1912, стр. 349. — Описание схемы генераторного торможения серийно-двигателя постоянного тока.
- Lain M., „J. A. I. E. E.“, 1922, № 3. — Классификация кранов, выбор электрического оборудования. Подсчет мощности. Схемы.
- Meyer, Neuerungen im elektrischen Antrieb von Hebezeugen, „V. D. I.“, 1919, стр. 617. — Описание схем подъемников.
- Michenfelder, Elektrische Hebezeuge, „E. T. Z.“, 1912, стр. 417. — Описание различных кранов.
- Rabinowitsch, Stromzuführungen für Hebezeuge, „E. T. Z.“, 1928, стр. 982.

- Rik, Neue Senkschaltung für Gleichstrom, „E. T. Z.“, 1916, стр. 257 и 491. — Описание схем торможения замыканием двигателя на себя. Выходные независимого возбуждения.
- Sicherheitsvorrichtung für elektrisch betriebene Bremsen, „E. T. Z.“, 1916, стр. 446. — Описание электромагнитных тормозов.
- Rosbeck, Beitrag zur Berechnung von Kranleitungen für Drehstrom, „E. T. Z.“, 1923, № 13. — Расчет подводящих проводов для кранов. Устройство и расчет реостата по схеме Калленберга.
- Rothe, Neue Steuerung für Greifkran, „S. Zeit.“, 1924, № 9. — Описание новой двухмоторной схемы для кранов, оборудуемых трехфазным током.
- Russ, Eine neue Senkbremsschaltung, „E. T. Z.“, 1916, № 20. — Описание схемы торможения сериес-двигателя постоянного тока.
- Russler, Leonardschaltung von Kranen, „E. T. Z.“, 1920, стр. 332. — Описание подъемного крана, оборудованного по системе Леонарда.
- Schiebeler, Die Leistungsbewertung der Elektromotoren für aussitzenden Betrieb, „E. T. Z.“, 1920, № 25 и 26. — Расчет на нагревание двигателя при работе с перерывами. Теория прерывистой работы.
- Schnabel, „J. A. I. E. E.“, 1922, № 4. — Схема соединения мотора и электрического управления кранами.
- Schnurmann, Eine neue Stufe in der Entwicklung des elektrischen Antriebs für Laufkran, „Förd.“, 1913, стр. 2 и 270. — Описание коллекторных двигателей переменного тока и применение их для кранового привода.
- Schüler, Der Wirkungsgrad von Elektromagneten, „E. T. Z.“, 1913, стр. 611. — Расчет электромагнитов.
- Schwarz, Zur Berechnung von Drehstrommagneten, „E. T. Z.“, 1910, стр. 935. — Подробная теория и расчет магнитов для торможения на переменном токе.
- Methode zur Ermittlung der Senkregulierwiderstände bei Hebewerken mit el. Senkbremsschaltung, „E. T. Z.“, 1914, стр. 116. — Графический расчет реостата для получения нужных скоростей при торможении сериес-двигателей при спуске.
- Sykon, Elektrische Greifkran, E. и M., 1920, стр. 91. — Описание кранов с грейфером. Режим работы, схемы.
- Sykon, Ein Dockkran mit neuartigem Längs- und Querfahrwerk, „V. D. I.“, 1919, стр. 9. — Описание докового крана.
- Weiler, Hebezeugschaltungen für Gleichstrom, „Förd.“, 1922, стр. 163. — Схемы кранов на постоянном токе с указанием различных способов торможения при спуске.
- Hebezeugschaltungen für Drehstrom, „S. Zeit.“, 1923, стр. 491. — Описание и разбор схемы противотока.
- Wintermeyer, Die neueste Entwicklung des elektrischen Antriebes von Hebezeugen u. Kranen, „Förd.“, 1922, стр. 53. — Описание различных крановых установок, схемы и приборы.
- Васильев, Электрическое оборудование кранов и подъемников, „Эл-во“, 1914, стр. 413-1915, стр. 129. — Схемы кранов на постоянном токе.
- Пресс С. А., проф., Электрические краны, изд. ЛОНТИ.

Магнитные краны

- Blau, Magnetverwendung im Eisenhütten und Verladebetrieb, „E. K. B.“, 1916, стр. 289. — Описание установок с электромагнитными кранами.
- Hermanns, Lasthebemagnete, „E. T. Z.“, 1915, стр. 542. — Теория и описание электромагнитных кранов.
- Kalisch, Beiträge zur Berechnung der Zugkraft von Elektromagneten, „E. K. B.“, 1913, стр. 692. — Теория и расчет магнитов.
- Liska, Berechnung von Wechselstromhubmagneten, „E. T. Z.“, 1910, стр. 985, 1020. — Теория электромагнитов и пример расчета магнита переменного тока.
- Michenfelder, Magnetkran, „V. D. I.“, 1911, стр. 800 и 854.
- Elektrische Hubmagnete, „E. K. B.“, 1910, стр. 419.
- Lasthebemagnete, „E. K. B.“, 1910, стр. 628.
- Elektrische Hubmagnete, „E. K. B.“, 1911, стр. 259.
- Magnetkran für Roheisenmassen, „E. T. Z.“, 1910, стр. 293. — Описание магнитного крана, его конструкция и действие.
- Pfiffner, Die Berechnung von Lasthebemagneten, „E. T. Z.“, 1912, стр. 29, 57. — Расчет магнитов постоянного и переменного тока.

- Russ, Lasthebemagnete, „E. T. Z.“, 1917, стр. 190, 205, 291. — Описание и теория электромагнитных кранов.
- Schäfer, Der Wirkungsgrad vom Elektromagneten, „E. T. Z.“, 1913, стр. 611 и 653. — Теория электромагнитов.
- Schwarz, Elektromagnetischen Greifer, „E. T. Z.“, 1921, стр. 929. — Описание установки с электромагнитным краном для перелоски железного лома.
- Magnetschrotgreifer, „E. K. B.“, 1929, стр. 176.

Лифты.

- Anett, High Speed Elevators Make Landing Stops Automatically, „Power“, 1928, стр. 640. — Описание лифта на большие скорости с автоматическим управлением.
- Eilert, Der Kraftbedarf von elektrischen und hydraulischen Hebezeugen, „V. D. I.“, 1912, стр. 1061. — Описание двух систем: электрической и гидравлической и сравнение экономичности работы их.
- Feld, Neuerungen im Bau elektrischer Aufzüge, „E. T. Z.“, 1914, стр. 129.
- Freisler, Amerikanische Personenaufzüge für grosse Geschwindigkeiten, „V. D. I.“, 1914, стр. 1250. — Схема и устройство лифта для скоростей до 10 м/сек. Аппараты управления. Предохранители.
- Maryat, Elektrische Aufzüge, „E. T. Z.“, 1916, стр. 185. — Описание системы лифтов и схема управления.
- „V. D. I.“, Druckknopfsteuerung für einen Personenaufzug, Stigler, 1911, стр. 1935. — Описание и схема лифта системы итальянской фирмы Шинглер.

Различные виды транспорта.

- Berloff, Elektrische Zugwagen für Lastförderungen, „V. D. I.“, 1917, стр. 365. — Описание электрической тележки, схема привода, конструкция.
- Böthke, Der Lastkraftwagen in der Güterförderung, „Förd.“, 1923, стр. 133.
- Dörr, Über Blockierung und Fernsteuerung für Elektrohängebahnen, „E. K. B.“, 1918, стр. 45. — Принципы и схемы блокировок для подвесных дорог.
- Hanfstengel, Versuche über Kraftbedarf von Fördermitteln, „V. D. I.“, 1913, стр. 445. — Приводятся данные испытания транспортеров.
- Hellnaich, Was leistet wirtschaftliche Flurförderung, „Förd.“, 1928, стр. 3.
- Müller, Wirtschaftliche Gestaltung des Gütertransports durch Lastkraftwagen, „Förd.“, 1928, стр. 47. — Экономическое сравнение транспорта грузов при помощи аккумуляторных тележек.
- Riedig, Elektrohübwagen, Elektroschlepper, „Förd.“, 1928, стр. 74. — Различное применение аккумуляторных тележек.
- Rüntscheiner, Die Verwendung schienenloser Drehstrombahnen in der Wald- und Holzindustrie, „Förd.“, 1922, стр. 21. — Описание канатной подвесной дороги для работы на лесных заготовках.
- Speck, Elektrohängebahn mit Drehstrom-Fernsteuerung, „Förd.“, 1919, стр. 217. — Схема дистанционного управления подвесной дорогой на трехфазном токе.
- Der Elektrokarren zum Lastentransport zwischen Schiff und Speicherraum, „Förd.“, 1921, стр. 333. — Описание аккумуляторной тележки и ее работа.
- Stein, Lastkraftwagen als Zugmaschine, „Förd.“, 1919, стр. 147.
- Stephan, Förderbänder in Glasfabriken, „Förd.“, стр. 49. — Описание ленточного транспортера. Конструктивное выполнение.
- Ринкевич С. А., Выбор наилучшего режима работы подъемной установки „Труды Научно-исследовательского института протранспорта“, вып. II.
- К вопросу о выборе рода тока и эксплуатационных коэффициентов для крановых установок (см. там же Труды НИИПТ), вып. II.
- Ринкевич, Фатеев и Норневский, Исследование электрической подвесной дороги в лаборатории электроприводов Ленингр. Электротехнического института им. Ленина (см. там же Труды НИИПТ), вып. II. Даны результаты определения сопротивления движению тележек и сравнения производительности и расхода энергии при постоянном и трехфазном токе.
- Ринкевич С. А., К вопросу о применении постоянного тока в промышленности, т. II Трудов I Всесоюзной конференции по электрификации СССР, Москва, 1932.
- Фатеев А. В., Выбор рода тока для портовых установок. Труды ЦНИВТ.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ.

- „А. Е. G.-Mitteilungen“, 1921, Mai/Juni. — Расход электрической энергии в приводах ножниц и прессов с регулируемым двигателем.
- 1928, стр. 101. — Краткое описание привода больших токарных станков с регулируемым двигателем.
- „В. В. С. Nachrichten“, 1929, № 3. — Описание электрического привода больших металлообразных станков.
- Becker, „Werkstatt Technik“, 1925, № 17. — Описание электрических схем управления карусельных станков. Приведены данные о количестве выпущенных станков подобного рода с кнопочным управлением.
- Bleck J., „Werkzeugmaschine“, 1929, № 3. — Преимущества кнопочного управления станков.
- Schladek W., „S. Zeitschrift“, 1929, стр. 109. — Описание одиночного привода.
- „Engineering“, 1925, № 7. — Описание и сравнение приводов продольно-строгальных станков по системе Леонардо и от регулируемого двигателя.
- „E. T. Z.“, 1914, № 14. — Электрический привод в мастерских.
- 1926, № 46. — Описание многомоторных приводов.
- Fein H., „Maschinenbau“, 1929, № 9. — Переносные станки с электрическим приводом.
- Gaepfen, „Werkz. Maschinen“, 1925, стр. 373. — Описание станков с приводом от моторов переменного тока с переключением полюсов.
- Heumann, „Betrieb“, 1921, № 23. — Влияние процесса реверса на экономичность работы продольно-строгального станка.
- Jacobl, „Schaltungen für Werkzeugmaschinen“. — Описание электрических схем управления различного рода станков.
- „Maschinenbau“, 1923, № 11. — Описание строгальных станков с электрическим приводом.
- „Machinery“, 1930, стр. 761. — Описание привода продольно-строгального станка по системе Леонарда.
- Meller K., „Maschinenbau“, 1922, № 7. — Экономичность приводов различных станков.
- „Maschinenbau“, 1929, № 11. — Применение электрического привода в металлообрабатывающих заводах.
- Merkel, „W. T.“, 1921, стр. 61. — Описание прессов, правильных валков и тому подобных станков с маховиком и без него.
- Müller O., „A. E. G.-Mitt.“, 1927, № 7. — Выпрямители для металлообрабатывающих станков.
- Neuenkirchen, „Maschinenbau“, 1925. — Сравнение одиночного привода с групповым с учетом всех постоянных и переменных расходов.
- Nikolaus, „W. T.“, 1921, стр. 190. — Применение привода от двигателя, расположенного на отдельной колонке.
- Pollok O., „A. E. G.-Mitt.“, 1927, № 3. — Описание схем кнопочного управления больших металлообрабатывающих станков.
- „A. E. G.-Mitt.“, 1927, № 7. — Электрический привод металлообрабатывающих станков.
- „A. E. G.-Mitt.“, 1928, № 3. — Применение фланцмоторов. Конструктивное оформление. Сравнение по габаритным размерам.
- „A. E. G.-Mitt.“, 1928, № 12. — Электрический привод больших металлообрабатывающих станков.
- „W. T.“, 1928, № 1. — Применение короткозамкнутых двигателей для привода станков.
- „W. T.“, 1928, стр. 152—159. — Статистика по американской станкостроительной индустрии в отношении выпускаемой продукции.
- „A. E. G.-Mitt.“, 1929, № 3. — Описание новейших приводов металло- и деревообрабатывающих заводов.
- „A. E. G.-Mitt.“, 1928, № 11, стр. 585. — Описание ножниц с электрическим приводом без маховика.
- „A. E. G.-Mitt.“, 1930, стр. 42. — Безмаховиковый привод ножниц. Критические замечания в отношении безмаховикового привода по системе Сименса.
- „V. D. I.“, 1914, № 17—18. — Электрический привод продольно-строгальных и долбежных станков. Конструктивное оформление, электрические схемы управления.
- „A. E. G.-Mitt.“, 1928. — Описание привода продольно-строгальных станков с двумя двигателями переменного тока.

- Pollok, O., W. T., 1930, стр. 493. — Распределение потерь в отдельных элементах передачи продольно-строгального станка.
- Schlesinger und Kurrein, Испытания шепинга с электрическим приводом. — Детальное испытание шепинга при различных оформлениях привода. Выявление влияния маховых масс.
- „Stahl und Eisen“, 1927, № 41. — Электрический привод жили с автоматической подачей.
- „V. D. I.“, 1916. — Описание станка с кнопочным управлением.
- Weidling, „A. E. G.-Mitt.“, 1929, № 8. — Конструктивное оформление электрического привода старых станков.
- „Werkstattstechnik“, 1928, № 7. — Описание привода портального фрезерного станка.
- Wintermeyer, „Masch. Konstr.“, 1928, № 4. — Электрический привод металло- и деревообрабатывающих станков.
- Ринкевич С. А., Методы исследования электроприводов, „Вестник электропромышленности“, 1932, № 1 и 2. — Помимо методов даны характерные примеры исследования и сводки результатов обследования приводов ленинградской промышленности в виде большого количества графиков.
- Исследование электропривода как контроль технологического процесса на станках, „Вестник металлопромышленности“, 1932, № 2. — Наряду с примером контроля указывается на вред, приносимый поспешной, неорудуманной заменой двигателей с целью повышения $\cos \varphi$, если одновременно не принимаются меры к увеличению использования станков.
- Кроме того большое количество данных о потребляемой станками мощности имеется у Научно-исследовательского сектора Ленингр. отд. ВЭО, работающего исключительно в области электропривода в промышленности.

Отдел С.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

Доменный цех.

- „A. E. G.-Mitteilungen“, 1930, № 7. — Электрический привод компрессоров.
- „Iron and Steel Engineer“, 1925, стр. 229—242, 269; 1918, стр. 43. — Электрический привод доменных подъемников.
- Moritz W., „St. и Eisen“, 1930, № 2, стр. 33—42. — Описание электрического оборудования мартеновского цеха (литейного) металлургического завода в Бохуме. Трехфазными крайними двигателями завод доволен; 20% двигателей заменяется в один год. На каждые 10 штук один в резерве с надежной половинкой муфты. Замена занимает не более $\frac{1}{2}$ часа. Все двигатели более 44 kW с электромагнитным управлением. Диаграммы нагрузки.
- „S. Zeitschrift“, 1931, 2. — Электрические измерения для домы.
- Карелли Н. Н., Расчет доменного подъемника.

Работа прокатки.

- Hermann M., проф., „St. и Eisen“, 1911, № 42. — Работа прокатки и давление на валки.
- Liss G., Полезная работа прокатки, „St. и Eisen“, 1922, стр. 681, 735, 768, 806, 891.
- I. Pappe und G. Stauber, Walzwerkwesen. Düsseldorf.
- Schmitz C., Bericht, № 40, d. F. d. V.-d. Eisenhüttenleute, 1925. — Сравнительные исследования работы прокатки.
- Weiss L., „Zeitschrift für Metallkunde“. — Подсчет мощности прокатки в зависимости от диаметра валков (пропорционально корню квадратному из диаметра).
- Werth A., Изучение работы прокатки на реверсивных станках, „St. и Eisen“, 1928, стр. 1680.
- Бычков В., „Уголь и железо“, 1925, стр. 153; 1926, стр. 89.
- Верещагин, проф., Введение в изучение прокатных станков и определение работы прокатки, 1908. — Классическая работа.
- Виноградов, Определение работы прокатки, журнал „Металлург“, 1930.
- Попов В. К., проф., „Электричество“, 1929, стр. 2. — Теория работы прокатки.
- Ринкевич С. А. и Бер Я. М., Определение работы прокатки цветных металлов и выбор мощности электрического двигателя, „Вестник металлопромышленности“, 1929, стр. 50—100. — Приводятся опытные данные для определения работы прокатки, методы их получения, численный пример построения диаграммы прокатки. Кроме того предложен метод расчета маховика и определения мощности электродвигателя.

Общая энергетика металлургических заводов.

- Holt Fr., „St. и Eisen“, 1930, № 1, стр. 1—15. — Подробное описание производственного и силового хозяйства завода Georgsmarienhütte.
 Anhaltzahlen für den Energieverbrauch in Eisenhüttenwerken, 1925. — Много материалов по энергетике металлургических заводов в Германии.
 Левицкий М. Н., проф., Бюллетень Гипромеза.

Электрический привод прокатных станов.

- „A. S. E. A.“, фирма, Electrical equipment for rolling mills, брошюра, № 582. — Содержит три статьи: 1) Электрический привод станов. Сравнение регуляторов скольжения. Электрические схемы для регулируемых станков. 2) Описание электрической установки Domnarvet. 3) Описание испытания электропривода реверсивного стана.
 „B. B. C.-Nachrichten“, 1930, № 1, стр. 33. — Расчет вентиляции электрических двигателей для станков.
 „Brown-Boveri“, фирма, Der elektrische Antrieb von Walzenstrasse, брошюра, 754—0, 1923. — Подробное описание электроприводов станков. Содержит две статьи: 1) Сравнение систем Кремера и Шербнуса и регулирования реостатом, 2) Установки Ильгнера — способ увеличения чувствительности системы, т. е. скорости реверса.
 Dumartin P., „Вестник металлопромышленности“, 1924, № 10—12. — Привод реверсивных станков.
 „El. Journal“, 1925, стр. 534. — Описание вентиляционной установки прокатных станков.
 „E. T. Z.“, 1915, стр. 63; 1919, стр. 383. — Быстродействующий регулятор.
 Hascoult G., „Revue Gen. d'Electric.“, 1922, стр. 837 и 877. — Привод реверсивных станков.
 „Iron AEG-Mitteilungen“, 1927, № 10, стр. 710. — (Перевод станков с парового привода на электрический вызвал понижение продукции на 25%.)
 Morgan, „Iron and Steel Engineer“, 1928, № 9-10. — Подробное описание и анализ систем электропривода прокатных станков.
 „V. D. I.“, 1910, стр. 743. — Контактные для управления электрических двигателей постоянного и трехфазного тока.
 Weight J., „Gen. El. Review“, 1926, № 6, стр. 380. — Прокатка проволоки, схема установок, диаграммы нагрузки.
 Winne H., The application of Synchronous Motors, „Gen. El. Review“, 1926, № 6, стр. 391. Сравнение синхронных и асинхронных двигателей по размерам, к. п. д., характеристикам, схемам пуска.
 Wolber, Der Einfaser Kommutatormotor im Kokereibetrieb, „B. B. C.-Mitteilungen“, 1927, № 7. — Электрические схемы оборудования коксовых печей однофазными электрическими двигателями переменного тока.
 „Вестник металлопромышленности“, 1924, № 4—6; 1925, № 3 и 4. № 5 и 6. — Перевод статьи P. Dumartin об электрическом приводе прокатных станков.
 „Вестник металлопромышленности“, 1928, № 7/8. — Определение мощности по обжатую и по смещенному объему.
 „Журнал Р. Мет. о-ва“, 1928, стр. 307. — Определение мощности по обжатую и по смещенному объему.
 Львов, „Вестник металлопромышленности“, 1927, № 11, стр. 59. — Влияние места установки маховика на равномерность хода.
 Попов В. К., проф., Электрический привод станков непрерывной прокатки (брошюра). — Описание систем электрического привода.
 Розен К. О. проф., Электрический привод станков непрерывной прокатки (брошюра). — Описание систем электрического привода.
 Уманский Л., „O. El. Review“, 1928, стр. 309. — Основные данные об агрегатах Леонарда-Ильгнера, мощности, скорости, влияние синхронных двигателей.
 — „The Mechanics of the Slip Regulator“, 1926, № 6, стр. 405. — Подробное описание регуляторов скольжения, расчеты, схемы, диаграммы нагрузки.
 — „Flywheels for Steel Mill Drives“, 1923, № 6, стр. 688. — Подробный расчет маховика. Численный пример.

Привод вспомогательных механизмов для прокатных станков.

- „A. E. G.-Mitteilungen“, 1930, № 9, стр. 592. — Электрифицированные подъездные заводские пути.

- „Demag-Nachrichten“, 1927, стр. 38; 1928, стр. 21; 1929, стр. 76, 94; 1930, стр. 19. — Электрические подвесные дороги в металлургии.
- „E. T. Z.“, 1920, N. 15. — Влияние масс. привода на пуск, применительный к выбору двигателей для роллангов.
- Gaze M., „Central Blatt des Hütten und Walzwerk“, 1927, № 3. — Электрический привод подъема валков прокатных станов.
- „Gen. El. Review“, 1928, № 6. — Вспомогательные двигатели, интересные сведения по эксплуатации электрических двигателей различных конструкций на американских металлургических заводах.
- „Iron and Steel Eng.“, 1926, № 10, стр. 437. — Электропривод кантовальных приспособлений.
- „Proc. Am. I. of E. E.“, 1909, стр. 1923. — Электропривод подъемного стола для прокатных станов.
- „Бюллетень Гипромеза“, 1929, № 1—2. — Выбор стандарта типов электрических двигателей для металлургических заводов. Автор рекомендует „металлургические“ двигатели постоянного тока для „прерывистой работы“ и асинхронные — для продолжительной работы.
- 1930, № 2. — Номер посвящен результатам работ конференции по выбору рода тока для металлургических заводов. На стр. 53 приведены интересные мнения иностранных консультантов Гипромеза, а на 61 — ответы на анкету.

Отдел D.

ГОРНОЕ ДЕЛО.

- Помимо книг и журналов, указанных в отделах подъемных установок и вентиляторов и компрессоров, можно рекомендовать следующие:
- Филиппи, проф. — Электрические подъемные машины.
- Швайгер, проф. — Электрические подъемные машины.
- Шклярский Ф. Н., проф. — Электрификация вращательного бурения (добыча нефти).
- Электрификация рудничного подъема, 1932.
- Рудничные электровозы, 1931.
- Шмаров В. — Справочник горного электрика-механизатора.
- Кроме того следующие статьи в сборнике „Очерки по горной электротехнике“, изданы в 1931 г. под редакцией проф. Г. Е. Евреинова:
- Евреинов Г. Е., проф. — Современные течения в электрооборудовании угледобычи.
- Берстель В. Н. инж., и Мороз В. Н. — Характеристика врубашинны как единого электромеханического комплекса.
- Уманский В. Б., доц. — Рудничный подъем как единый электромеханический агрегат.
- Автоматизация рудничного подъема с приводом от асинхронного двигателя.
- Пирожный П. П., доц. — Выбор электропривода для компрессорных установок.
- Philippi, Elektrizität im Bergbau (книга).
- Следующие статьи из журнала „Elektrizität im Bergbau“.
- Тетрадь 2, 1930 г. А. Кнief. — Электрооборудование для больших врубовых машин.
- Тетрадь 7, 1930 г. Юст. — Электрическое оборудование скреперных лебедок.
- Тетрадь 10, 1930 г. Э. Мейср. — Данные о работе подъемно-транспортного оборудования и врубовых машин в каменноугольных шахтах.

Отдел E.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД В ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

- „A. E. G.“, фирма: 1) Elektrischer Antrieb von Cottonmaschinen; 2) Der neue A. E. G.-selfaktor-motor; 3) Der Elektrische Einzelantrieb der Wanderdekkelkarde; 4) Dynamik und Konstruktion von Spinnstoffmotoren; 5) Elektrischer Einzelantrieb von Ringlopfmotoren, 1929—1931. — Серия брошюр, посвященных описанию и техническим данным выполняемых „A. E. G.“ специальных приводов.
- Guildford, Электрический привод ситцепечатных машин, „J. A. I. E. E.“, 1922, № 2. — Схемы, цифры необходимой мощности (опытные данные электрического управления). См. „Текстильные новости“.

- „Leipziger Monatschrift, für Textilindustrie“, „Siemens Zeitschrift, Textilheft“. — Весь номер посвящен текстильной промышленности.
- „Schorch Technische Mitteilungen“, М 200—М. 216, 1924—26. — Серия брошюр, посвященных описанию осуществленных и нормально изготавливаемых Schorch'ом электроприводов в текстиле — ткацких, ватеров с двухчастотной сетью, селф-факторов и др.
- Spink R. I., Привод ткацкого станка, „V. D. I.“ 1928, № 26, перевод М. П.; „Текстильные новости“, 1929, № 9, — О колебаниях в трансмиссионных воллах и при одиночном приводе.
- Stiel W., Elektrobetrieb in der Textilindustrie, Leipzig, 1930. — Книга, стремящаяся с максимальной полнотой отразить состояние техники применения электричества в текстильной промышленности, начиная от котельной блок-станций и кончая электрическим освещением, электрической очисткой воздуха, транспортом и применением электрохимии. Центральную часть занимает электропривод бажкаброшей, кольцевых и рогулячатых ватеров, селф-факторов, прядильных центрофуг, ткацких станков, ситцепечатных станков, отжимных центрофуг.
- Апаров, О конструкции центрофуг для фабрик искусственного шелка, „Электричество“, 1931, № 2. — Обзор конструкций и библиография.
- Броун Вовери & Кольцевой ватер с электрическим приводом, 1911. — Обоснование необходимости регулировки скорости кольцепрядильного ватера с числовым примером.
- Кричевский, Основные черты электрооборудования текстильных фабрик (книга). — Экономические обоснования одиночного привода ткацких станков, ватеров, кардных машин и селф-факторов.
- Риктер, Электрический привод на текстильных фабриках, „Вестник электропромышленности“, 1930, № 9—10. — Описание установок, выполняемых ВЭО.
- Коллекторные двигатели для одиночного привода кольцевых ватеров, „Вестник электропромышленности“, 1930, № 3. — Краткое обоснование, описание и данные установки ВЭО на Иваново-Вознесенских фабриках.
- Соколов, Индивидуальный привод шпальочной чесальной машины от электромотора. Перевод статьи инж. Бальгу и Кэзб, „Текстильные новости“, 1928, № 12. — О времени рашона кардной машины при групповом и одиночном приводе. Описание конструктивного выполнения одиночного привода.
- „Текстильные новости“, 1928, № 8—9, Регулирование числа оборотов текстильных машин. — Обзорная заметка, переведенная Тагуновым из „Leipziger Monatschrift für Textilindustrie“.
- Перевод из брошюры SSW M. Коган, Регулирование скорости кольцевых ватеров. — Обзорная заметка.
- Перевод Н. Т. из „Melliand Berichte“, Значение к. п. д. электромоторов в текстильной промышленности. — Экономические подсчеты, связанные с улучшением к. п. д. (см. Schorch „Stromsparmotoren“).
- Трапизы В. И., Электрический привод ситцепечатных машин. — Сравнение одиночного привода следующих систем: асинхронный двигатель, шунтовой мотор, пятипроводная система, система Леонарда и коллекторный двигатель. Данные о мощности и режиме работы.
- Электрический привод в текстильной промышленности. Ткацкая фабрика.
- Хантон, Механика текстильных машин, изд. „Осиена“, 1927. — Элементарное изложение теории механизмов прядильных, приготовительных и ткацких станков. Особенно интересна глава „Сила, потребная для движения машин“.

Отдел F.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД В БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

- „A. E. G.“, Elektrizität in der Papierindustrie, Berlin, 1923. — Книга (395 стр.) описательного характера и охватывает собою все энергетическое хозяйство бумажных фабрик. Относительно подробно разобран вопрос о приводе дефибреров и бумажных машин. Имеется большое количество принципиальных схем и фотографий установок.
- „A. E. G. Mitteilungen“. — Номер посвящен специально бумажной промышленности и содержит ценные статьи полую описательного характера по приводу дефибреров, родлов, конических мельниц, многомоторному и одиомоторному приводу бумажных машин, каландров и накатов, где отмечены основные моменты выбора привода. Все статьи обильно снабжены пояснительными кривыми и фотографиями. Особенно ценны статьи о дефибрерах, бумажных машинах и

- каландрах. Кроме указанного, имеются также статьи о распределительных устройствах и освещении бумажных фабрик с указанием рекомендуемых освещенностей различных отделов.
- Brecht W. und E. Schain, Stetigschleifer und Pressenschleifer, „*Wochenblatt für Papierfabrikation*“, 1931, MO. — Статья сравнивает две системы, главным образом с точки зрения энергетики, и приводит ряд ценных кривых о влиянии различных факторов на потребление энергии дефибрера.
- Eibing, Die Regulierung des hydraulischen Grosskraftschleifers, „*Wochenblatt für Papierfabrikation*“, 1928, № 26, 28 и 32. — В статье автор развивает теорию регулирования прессовых дефибреров.
- Ergwin Sonne, Die Regelung der Holzschleifereien, 1928, № 37, 41 и 45; 1929, № 2, 12 и 13. — В статье автор вначале подробно останавливается на выводе формулы подсчета мощности дефибрера, а затем рассматривает регулирование дефибреров в зависимости от способа привода.
- Golds, Kraftersparnis an Papiermaschinen, „*Wochenblatt für Papierfabrikation*“, 1928, № 24, 27, 34, 39, 44 и 52; 1929, № 8, 19, 26, 30, 40 и 43. — В обстоятельной статье автор — путем ряда подсчетов, ссылок на опытные данные — доказывает целесообразность применения на бумажных машинах роликоподшипников. В статье разобран ряд примеров применения тех и иных подшипников.
- Kraftbedarf von Papiermaschinen, „*Wochenblatt für Papierfabrikation*“, 1925/26. — Книга (92 стр.) содержит подробный подсчет мощности бумажной машины путем суммирования всех сил трения, имеющих место в отдельных частях бумажной машины, и приводит кривые для сравнения полученных результатов с подсчетами Rappold'a.
- Grotberlet J., Der elektrische Kalandrantrieb, „*Sachsenwerk-Mitteilungen*“, 1929, № 6. — Статья рассматривает принципиальные схемы привода каландра, а также конструкцию некоторых частей привода.
- Kuhn H., Mehrmotorenantrieb einer Feinpapiermaschine, „*Der Papierfabrikant*“, 1929, № 2. — В статье описывается привод к машине 2850 mm и 15—120 m/min установки фирмы „Brown-Boveri“ и приводится несколько кривых и фотографий.
- Rappold, Theorie des Antriebs und Kraftbedarfs von Papiermaschinen, H. Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Berlin, S. 42, 1927. — В брошюре (29 стр.) автор приводит метод подсчета мощности, потребляемой бумажными машинами со скользящими подшипниками, посредством подсчета трения во всех частях машины. Имеется целый ряд таблиц значений моментов сопротивления отдельных частей бумажных машин различной ширины.
- Rahn A., Kraftverbrauch von Halb und Ganzzeug in der Papierfabrikation, Otto Elsner, Berlin, S. 42, 1913. — В книге (23 стр.) рассмотрен ряд практических случаев работы роллов, а также приведены графики их нагрузки.
- Schieben F., Sérienschaltung der Papierzüge bei elektrischen Mehrmotorenantrieb der Papiermaschine, „*Der Papierfabrikant*“, 1929, № 14. — Автор рассматривает ряд возможных случаев последовательного включения приспособлений для установки натяжения бумаги и приводит несколько принципиальных схем.
- Zur Frage der Rentabilität des elektrischen Papiermaschinen-Antriebes, „*Wochenblatt für Papierfabrikation*“, 1927, № 29 и 30. — В статье сравниваются экономически приводы бумажных машин от одномоторного привода, многомоторного и от паровой машины.
- Schneider I., Flüssigkeits Getriebe oder elektrischer Antrieb in der Papierindustrie, „*A. E. G.-Nachrichten*“, № 49. — Статья сравнивает гидравлический и электрический приводы бумажных машин как с экономической, так и с эксплуатационной стороны.
- S. S. W., „*Siemens Zeitschrift, Papiersonderheft*“, Berlin, Siemensstadt, 1927, № 5. — Содержание журнала аналогично указанному на стр. 496 „*AEG-Mitteilungen*“, но с большим уклоном в описательную сторону.
- Der elektrische Antrieb der Papiermaschine, Siemens-Schuckert. — Брошюра (16 стр.) дает краткое описание систем приводов бумажных машин, изготавливаемых фирмой S. S. W.
- Stiel W., Elektrische Papiermaschinenantrieb, S. Hirzel, Leipzig 1924. — В книге (286 стр.) автор подробно рассматривает все возможные случаи привода бумажных машин. Имеется большое количество графиков и принципиальных схем, характеризующих работу привода как с механической, так и с электрической стороны.
- Weiske P. und K. Ruprecht, Entwicklung des Kraftbetriebes in der Deutschen Papierindustrie, „*Der Papierfabrikant*“, Jubiläums Heft, 1927. — Статья описательного характера, написанная сотрудниками фирмы A. E. G.

Шмидт И., Привод бумажных машин, Berlin-Paris, Russland, 1931. — Последние новинки, применяемые фирмой А. Е. Г. для привода бумажных машин. Приведен целый ряд схем и фотографий. Между прочим там описана последняя контакторная система многомоторного привода, применяемая А. Е. Г. Брошюра издана на русском языке.

Богатый материал по экспериментальной проверке мощности, потребляемой различными машинами бумажного производства (в частности многомоторным приводом бумажных машин) имеется у Научно-исследовательского отдела ЛОВЗО.

Отдел Г.

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ЗАВОДОВ ПОРОШКООБРАЗНОГО ТОПЛИВА И ЦЕМЕНТНЫХ.

Anderson, El. motor starters, „J. of A. I. E. E.“, June 1922, стр. 310. — Описание пусковых устройств; много графиков.

„El. Review“, 1922, стр. 148. — Электрический привод на цементных заводах — описательный характер.

Jeffrey F., Application of electric Motors in the Cement Mills, „J. A. I. E. E.“, 1927, стр. 1112; 1923, April. — Электрификация цементных заводов.

„J. of A. I. E. E.“, 1922, № 4, стр. 360. — Применение асинхронных двигателей в цементном деле.

— Magnetic clutches, 1922, № 4, стр. 363. — Описание электромагнитной муфты в применении к тяжелому приводу.

Hopferwieser S., Zwangsläufige Steuerungen in Zementfabriken, „Br. Boveri-Mitteilungen“, 1931, стр. 279—287. — Схемы автоматического управления электрическими приводами в цементных заводах.

— Über den Anlauf von Rohrmühlern, „Br. Boveri-Mitteilungen“, 1932, № 3, стр. 109. — Диаграммы, характеризующие пусковые условия цементных мельниц.

— Брошюры В. В. С., № 1196-D, март 1930; № 1253-D, октябрь 1930; № 1195-D, июнь 1930; № 959-F, 1929. — Описание новейших установок фирмы „Броуи Бовери“ на цементных заводах.

Marr Otto, Das Trocknen und die Trockner, 1914. — Классический подсчет теплового баланса сушилок.

Naska, Цементное дело. — Ценная литература по подсчету мощности дробилок, барабанов, мельниц и т. п.

— Mühl und Zerkleinerungs-Anlagen. — Ценная литература по подсчету мощности дробилок, барабанов, мельниц и т. п.

Williamson, El. Motors in the Cement Industry, „Proc. A. I. E. E.“, 1918, декабрь. — Электрический привод в цементном деле. Много эмпирических формул для подсчета мощности. Графики.

Корзухин, Добыча и обогащение руд. — Ценная литература по подсчету мощности дробилок, барабанов, мельниц и т. п.

Отдел Н.

МУКОМОЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.

„American Miller“, Электрический привод на мельницах, 1915. — Режим работы станков, характер привода, тип двигателей.

Baumgartner, Handbuch v. Mülerei, 1903. — Эмпирические данные о мощности станков. Результаты испытаний станков. Описание. Проектирование мельниц.

Hanfstengel, Расход энергии транспортными машинами, „V. D. I.“, 1913. — Результаты испытаний.

Simon, Испытание мельницы Veploh, „The Miller“, 1903. — Мощности мельничных станков. Кривые нагрузки.

Афанасьев, Мукомольное производство, 1883. — Определение мощности валцовых станков. Теоретический расчет.

Бершадский, Определение мощности двигателей, „Русский мельник“, 1911, № 3. — Эмпирический подбор мощности для мельниц.

Зворыкин, Пневматический транспорт зерна, „Русский мельник“, 1911, № 11. — Описание методов транспорта.

Рейсх, Монтаж русских мельниц, 1915. — Данные о мощности станков.

НЕФТЯНОЕ ДЕЛО.

- „Electric Journal“, 1914, № 12. — Статьи о применении электрической энергии в нефтяных промыслах.
- „El. World“, 1916, декабрь. — Статьи о применении электрической энергии на нефтяных промыслах.
- „E. T. Z.“, Электрический привод в нефтяной промышленности, 1928, стр. 105. — Описание электрических установок.
- „G. E. R.“, 1914, № 8. — Статьи о применении электрической энергии на нефтяных промыслах.
- Steiner, Выбор двигателя, „E. K. B.“, 1914. — Описание установок в Румынии.
- Tiefbohrwesen und Elektrotechnik in der Erdölindustrie. — Книга содержит подробное описание применения электрического привода на нефтяных промыслах.
- Брайтон, Электрический привод, „El. World“, 1920, № 10. — Применение двух-скоростных асинхронных двигателей на нефтяных промыслах.

Отдел K.

КОМПРЕССОРЫ, ВЕНТИЛЯТОРЫ, НАСОСЫ.

- Baudisch K., „Siemens-Zeitschrift“, 1925, № 9. — Электрический привод машин с вентиляторным моментом сопротивления.
- Cotton H., „Electr.“, 1924. — Анализ работы синхронного двигателя.
- Doherty, „G. E. R.“, 1920. — Применение маховика для синхронного двигателя, приводящего в движение компрессор.
- Dreyfus, „E. u. M.“, 1922. — То же, что у Doherty.
- „Elektrizitätswirtschaft“, Синхронные двигатели для компрессоров, 1927, стр. 168. — Экономические результаты в отношении cos φ.
- „E. T. Z.“, Электрический привод насосов по системе Леонарда, 1929, стр. 129. — Описание.
- Höfelfelder E., Grafisches Verfahren zur Ermittlung der wirtschaftlichsten elektr. Kreislümpenantriebes bei kleinem Regelbereich, „A. E. G.-Mitteilungen“, 1929, № 4, стр. 276/290. — Автор подробно анализирует характеристики нагрузки и дает графический способ определения наилучшего способа регулирования для различных условий.
- Karras G., „V. D. I.“, 1923, № 27. — Сравнение экономичности регулирования центробежных насосов.
- „Refrig. Eng.“, 1924, стр. 123—142. — Расчет маховика для синхронного двигателя компрессора.
- Stevenson, „G. E. R.“, 1922, стр. 690. — Расчет маховика для синхронного двигателя с пульсирующей нагрузкой.
- „G. E. R.“, 1925, стр. 580 и 731. — Метод краткого расчета маховика.
- Герман А., О совместной работе вентиляторов. — Приложение к „Горному журналу“, 1921, № 9.
- Давидов, К вопросу о проектировании электрических насосных станций для оросительных целей, „Известия Ф-ва электр.“, 1916, стр. 164.
- Лацинский А., Параллельная работа вентиляторов. — Приложение к „Горному журналу“, 1921, № 9.
- Применение подачи воздуха для электрических вентиляторов. — Приложение к „Горному журналу“, 1921, № 18.
- Ринкевич С. А., Рациональный электрический привод компрессоров. — Журнал „Стандартуголь“ 1932, № 1, 2, 3 и далее.

Отдел L.

ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ.

- Clement, „Gen. El. Review“, 1924, № 9. — Электрификация паркетного завода.
- „Elektrician“, 1920, стр. 387. — Электрический привод деревообделочных станков (групповой и одиночный).
- „El. und Maschinenbau“, 1920, стр. 438. — Электрический привод деревообделочных станков (групповой и одиночный).

- „El. und Kraftbetriebe“, 1920, стр. 265, 273, 291, 299. — Электрический привод деревообделочных станков (групповой и одиночный).
- „Engineer“, 1924, В. 137, стр. 26. — Электрический привод пилы и строгального станка.
- „Fördertechnik“, 1927, стр. 400. — Расчет пневматического устройства для отсасывания стружек.
- „G. E. R.“, 1918, стр. 151. — Привод лесопильных рам.
- Rowis Bale, The driving of wood-working machinery, London, 1916. — Типичные приводы лесопильных машин.
- Песоцкий Н., Лесопильное дело со всеми вспомогательными к нему производствами. — Описание современных машин и аппаратов для распиловки леса и использования остатков. Описание оборудования лучших заводов в России и С.-А. С. Штатах.
- Лесопильное дело (сокращенный курс). — Описание современных машин и аппаратов для распиловки леса и использования остатков. Описание оборудования лучших заводов в России и С.-А. С. Штатах.
- „Электрификация лесопильных заводов“. — Бюллетень техников московского района, 1917, № 2. — Описание примитивного электрического оборудования лесопильных машин.
- Петипа, Расход энергии на деревообделочных станках, Лесотехнологический сборник, 1929 г.
- Кроме того большое количество данных о потребляемой этими станками мощности имеется у Научно-исследовательского сектора Л. Отд. ВЭО, работа которого протекает исключительно в области электропривода.
- Одна из работ напечатана в качестве примера к статье проф. Ринкевича, „Вестник электропромышленности“, 1932, № 2.

Отдел М.

ТИПО-ЛИТОГРАФСКОЕ ДЕЛО.

- „Электричество“, 1912, стр. 425. — О применении электричества в типографском деле.
- „A. E. G.-Mitteilungen“, 1930, стр. 692. — Электрификация печатной ротационной машины.
- „Electrical World“, 1920, стр. 165, 237, 443, 637. — Групповой и одиночный электрический привод типографских машин.
- 1926, стр. 953.
- „Electrician“, 1924, 29 февр. — Электрический привод печатных машин.
- „Elektrotechnik und Maschinenbau“, 1920, стр. 401. — Групповой и одиночный электрический привод типографских машин.
- „General Electric Review“, 1923, № 11. — Электрификация печатной ротационной машины.
- 1923, стр. 764. — Электрический привод печатных машин.
- „Journal of the American Institute of Electrical Engineers“, 1921, стр. 912. — Электрический привод в литографском деле.
- Meyer, „Helios“, 1919, стр. 281. — Электрификация ротационных печатных машин (постоянный ток).
- „Mitteilungen der A. E. G.“, 1920, стр. 123, 135. — Групповой и одиночный электрический привод типографской машины.
- „Siemens Zeitschrift“, 1923, № 7. — Электрификация печатной ротационной машины. Чертежи и схемы.
- 1923, № 5. — Электрический привод печатных машин.
- „Электрическое дело“, 1917, № 2. — Новый тип литографских индукционных моторов с переменной скоростью.
- „Электричество“, 1912, стр. 425. — О применении электричества в типографском деле.

Отдел N.

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

- Buschkiel, „E. T. Z.“, 1919, стр. 369. — Электрификация сельского хозяйства.
- Charbonier, „E. T. Z.“, 1920, стр. 135, 468, 471. — Электричество в сельском хозяйстве.
- Desamarge, „Revue generale de l'electricité“, 1919, стр. 507, 795. — Электрификация сельского хозяйства.

- „Revue generale de l'électricité“, 1920, стр. 49, 71, 515. — Электрическая пахота.
- „Electrical Review“, 1917, стр. 62, 88, 116. — Применение электричества в сельском хозяйстве.
- „El. World“, 1924, № 13, стр. 33. — Электрическая молотба.
- „Engineering“, 1915, стр. 394, 516. — Испытание моторных тракторов.
- 1915, стр. 550, 574, 597. — Сельскохозяйственные двигатели.
- „Engineer“, 1915, стр. 361, 408, 476. — Будущее моторных плугов. Сравнение систем моторов.
- 1915, стр. 570. — Результаты испытания механических плугов во Франции.
- „E. T. Z.“, 1920, стр. 419. — Электрическая пахота.
- 1919, стр. 10. — Электрические плуги.
- 1924, № 38. — Цифровые данные об экономичности электрической молотбы. Экономическое сравнение дизеля, локомобиля и электрического мотора в зависимости от использования.
- „Genie Civil“, 1915, № 23 и 24. — Сельскохозяйственные тракторы.
- Growley, „The Electrician“, 1919, стр. 252. — Электрификация сельского хозяйства.
- „Hellas“ 1916, стр. 33. — Сравнение электрической пахоты.
- Horpe, „Elektro-Journal“, стр. 90. — Электрификация сельскохозяйственных машин.
- „J. A. I. E. E.“, 1926, стр. 1151. — Электрический привод экскаваторов.
- Kogohne, „Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure“, 1919, стр. 449, 479. — Электрификация сельского хозяйства.
- Passavant, „El. Kraftbetriebe und Bahnen“, № 16. — Цифровые данные об экономичности электрической молотбы.
- Petri, „Elektrotechnische Zeitschrift“, 1919, стр. 561. — Электрификация сельского хозяйства.
- „Двигатель“, 1917, стр. 25. — Современные сельскохозяйственные тракторы.
- Завалишин и Буданцев, Исследование электродвигателя с переключающимися обложками статора. — Печатается.
- „Известия Киевского Политехнического института“, 1915, стр. 48. — О новых динамометрах для испытания сельскохозяйственных машин и орудий.
- „Известия Бюро по сельскохозяйственным машинам“, 1915, стр. 1. — Испытание трактора Могуа.
- 1915, стр. 20. — Испытание трактора Кейс.
- т. VII, вып. VI, стр. 139. — Подробное испытание сельскохозяйственных машин.
- Мэттьюс Р. Б., Электрификация сельского хозяйства, ГНТИ, 1931, стр. 255. — Перевод с английского.
- Родионов, Электросилосование.
- Скобелцын и Новичков, Электромагнитный сепаратор для очистки семян. — Печатается.
- Скобелцын и Родионов, Рациональное использование скотных дворов.
- Смирнов С. П., Электропахота. Сельхозгиз, 1932.
- Электропривод в сельском хозяйстве, 1931.
- „Электрификация сельского хозяйства“, 1931. — Ряд статей.
- „Электричество“, 1913, стр. 447. — К вопросу о сооружении областной центральной электрической станции в сельскохозяйственных округах.

Отдел О.

УЛУЧШЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ.

- Baillaguet, „Rev. G. El.“, 1925, 10/1. — О синхронизированных асинхронных двигателях, их теория и свойства.
- Baudisch, „S. Zeit.“, 1924, № 19. — Причины возникновения сдвига фаз и методы увеличения $\cos \varphi$.
- Berkshire, „G. El. Rev.“, 1920, стр. 112. — О синхронном электродвигателе, его свойствах и влиянии на общий $\cos \varphi$ установки.
- Bichseler, „S. Zeitschr.“, 1922, № 4. — Описание конструкции синхронного двигателя с асинхронным пуском для больших начальных моментов.
- Buchholz, „E. T. Z.“, 1919, стр. 101 и 331. — Об учете потребления реактивной энергии.
- „E. K. B.“, 1920, стр. 201. — К вопросу о коэффициенте мощности и его исправлении.
- Bussmann, „E. T. Z.“, 1918, стр. 93. — О реактивной энергии в сетях переменного тока и учет этой энергии при эксплуатации установок.

- „Mitt. d. V. d. El. W.“, 1919, стр. 241 и 242. — О штрафном тарифе как средстве для улучшения $\cos \varphi$.
- Carpenter, „P. Am. El. E.“, 1919, стр. 997. — Об улучшении $\cos \varphi$ при помощи синхронных компенсаторов.
- Carr, „J. Am. El. E.“, 1922, февраль. — Описание нового типа синхронизированного асинхронного двигателя.
- „J. Am. El. E.“, 1923, июнь. — Описание синхронизированного индукционного двигателя, его принцип действия, теория и свойства.
- Darey, „El. Review“, 1919, стр. 484, 536, 569, 602. — О коэффициенте мощности, о работе установок с низким $\cos \varphi$ и о мерах для увеличения $\cos \varphi$.
- Dreyfus, E. и M., 1922, стр. 457. — Описание синхронизированного двигателя и его принцип действия.
- Fynn, „J. Am. El. E.“, 1924, август. — Теория самовозбуждающегося синхронизированного асинхронного двигателя.
- Geweske, „S. Zeitschr.“, 1921, № 4. — Опытное исследование работы синхронного двигателя с асинхронным пуском.
- Heumann, „El. im B.“, 1926. — Применение компенсированных электродвигателей для привода машин с повторно-кратковременным режимом работы.
- Hippe, „Mitt. d. V. d. El. W.“, 1921, Sonderheft. — Специальный способ включения электродвигателя для сельскохозяйственных машин для получения высокого $\cos \varphi$.
- Horswagner, „Dev. El. B.“, 1923, стр. 225. — Новая схема компенсированного асинхронного двигателя и его свойства.
- Hufl, „J. Am. El. E.“, 1920, стр. 458. — Теория многофазных коллекторных машин с точки зрения их коэффициента мощности.
- Kade, „E. T. Z.“, 1924, стр. 456. — Обзор существующих систем компенсированных асинхронных двигателей.
- Kaden, „Arch. f. El.“, 1925, стр. 465. — О круговой диаграмме асинхронного двигателя с фазокомпенсатором.
- Kosizek, „E. T. Z.“, 1925, стр. 142. — О работе асинхронного двигателя с фазокомпенсатором с независимым возбуждением. Влияние этих машин на $\cos \varphi$ заводов.
- Kraska, „E. T. Z.“, 1924, стр. 321. — Описание и свойства компенсированного асинхронного двигателя.
- Kyser, „Mitt. d. V. d. El. W.“, 1921, Sonderheft. — Практические вопросы, связанные с улучшением $\cos \varphi$ установок.
- Leyerer, „S. Zeit.“, 1926, № 4. — Специальный возбудитель для асинхронных двигателей.
- Liwschitz, E. и M., 1926. — О работе асинхронного двигателя в соединении с самовозбуждающимся фазокомпенсатором.
- Lund, „Arch. f. El.“, 1925, стр. 237. — Теория асинхронного двигателя с фазокомпенсатором.
- Möllinger, „Mitt. d. V. d. El. W.“, 1921, Sonderheft. — Измерение реактивной составляющей тока.
- Monier, „Rev. G. El.“, 1924, № 7. — Принцип действия и свойства синхронизированного асинхронного электродвигателя.
- Nehlsen, „E. T. Z.“, 1917, стр. 584. — Об улучшении $\cos \varphi$ асинхронного двигателя при помощи фазокомпенсатора с последовательным возбуждением.
- Orion, „E. T. Z.“, 1925, Sonderheft. — Работа асинхронного двигателя с возбудителем переменного тока и влияние его на $\cos \varphi$.
- Rosenberg E. и M., 1919, стр. 353. — О значении $\cos \varphi$ при эксплуатации фабрично-заводских установок.
- Rüdenberg, „E. K. B.“, 1914, стр. 425. — О необходимости улучшения $\cos \varphi$.
- „S. Zeitschr.“, 1922, № 1 и 2. — Природа реактивной мощности, эксплуатационные недостатки низкого $\cos \varphi$ и меры для увеличения его.
- Sárosi, „Electrotecnica“, 1922, 15/IX. — Теория и принцип действия синхронизированного асинхронного двигателя.
- Schagowsky, „S. Zeit.“, 1924, № 2. — Методы улучшения $\cos \varphi$ в фабрично-заводских предприятиях.
- Der $\cos \varphi$ und seine Verbesserung. — Описание способов улучшения $\cos \varphi$, применяемых фирмой S. S. W.
- Schenkel, „E. T. Z.“, 1924, стр. 1925. — О постепенном развитии фазокомпенсаторов для асинхронных двигателей.
- „S. Zeit.“, 1927, № 3. — Об асинхронных компенсаторах безваттной мощности, их достоинства и эксплуатационные качества.
- „E. T. Z.“, 1927, № 17 и 18. — Область применения асинхронных компенсаторов. Их теория и конструкция.

- Scherblus, „E. T. Z.“, 1915, стр. 299. — О шунтовом фазокомпенсаторе, его теории и описание.
- Smitz, „E. и M.“, 1924, стр. 601. — Теория компенсированных асинхронных двигателей.
- Schüler, „V. D. I.“, 1923, стр. 495. — Причины низкого значения $\cos \varphi$ в фабрично-заводских установках и меры для его улучшения. Описывается модель синхронизированного двигателя с самовозбуждением.
- „E. T. Z.“, 1923, № 1. — Описание и свойства небольших самосинхронизирующихся асинхронных двигателей.
- Sels, „El. Journal“, 1921, стр. 419. — Об улучшении $\cos \varphi$ в металлургических предприятиях.
- Silste, „J. Am. El. E.“, 1920, стр. 542. — О $\cos \varphi$ в сетях переменного тока и его влиянии на работу установки.
- Soulier, „Revue Gén. d'El.“, 1919, стр. 831. — О значении коэффициента мощности и о мерах борьбы с ним.
- „Genie Civil“, 1920, стр. 39. — О значении коэффициента мощности и о мерах борьбы с ним.
- Torda, „E. T. Z.“, 1924, стр. 595. — Описание компенсированного асинхронного двигателя системы автора.
- Underhill, Power-Factor Wastes.
- Voller, „E. T. Z.“, 1919, стр. 314. — Об учете потребления реактивной энергии.
- Zipp, Der Leistungsfaktor und Mäße zu deren Bekämpfung.
- Апаров, „Электричество“, 1925, стр. 159. — Свойства асинхронного двигателя, работающего с фазокомпенсатором.
- Голов, Гохберг, Завалишин, Костенко, Попов, Ринкевич и Фатеев, Косинус φ . — Сборник монографий по коэффициенту мощности, под редакцией проф. Ринкевича. Л. Ф. Научно-исследовательский институт энергетики и электрификации, изд. Энергоиздат. (Печатается).
- Завалишин, „Электричество“, 1926, стр. 25. — Теория и свойства синхронизированного асинхронного двигателя.
- Костенко и Лютер, „Электричество“, 1926, стр. 12. — Теория компенсированных асинхронных двигателей.
- Курбатов С. И., Коэффициент мощности и методы его улучшения.
- Фурман, Коэффициент мощности и способ его исправления.
- Шенфер К. И., „Электричество“, 1924, № 7. — Теория синхронизированного асинхронного двигателя и его свойства.

Отдел Р.

РАЗНОЕ.

- Электрический привод в резиновой промышленности.
- „B. V. C.-Nachrichten“, 1928, № 1, стр. 13.
- „E. T. Z.“, 1921, стр. 763.
- „J. A. I. E. E.“, 1921, стр. 35.
- Электрический привод в сахарной промышленности.
- „A. E. G.“ (брошюра), *Électricité in der Zuckerindustrie*.
- „Bergmann-Mitteilungen“, 1926, Н. 13, стр. 17 и 40. — Интересное сравнение экономичности регулирования.
- Значение перерывов тока в промышленности и способы устранения их.
- „E. T. Z.“, 1926, стр. 130.
- „Рационализация электрохозяйства“ судоремонтных баз.
- Одинцов Г. В., Труды Ц. Н. И. В. Т. (печатается).

СОКРАЩЕННЫЕ НАЗВАНИЯ В СПИСКЕ ЛИТЕРАТУРЫ.

- A. E. G. — Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft.
- A. E. G.-Mitt. — A. E. G.-Mitteilungen.
- Arch. f. E. — Archiv für Elektrotechnik.
- B. V. C. — Brown Boveri Company.
- Electr. — The Electrician.
- E. i. B. — Elektrizität im Bergbau.
- E. J. — Electric Journal.
- E. K. B. — Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen.
- E. R. — Electric Review.

E. T. Z. — Elektrotechnische Zeitschrift.
E. u. M. — Elektrotechnik und Maschinenbau.
E. W. — Electrical World.
Förd. — Fördertechnik.
J. A. I. E. E. — Journal of the American Institute of Electrical Engineers.
Hel. — Helios.
I. St. E. E. или I. a. St. — „Iron and Steel Engineer“. (Journal of Association of Iron and Steel Electrical Engineers). Pittsburgh. Pa.
Mach. — Machinery.
Masch. — Maschinenbau.
Masch. Konstr. — Maschinen Konstrukteur.
Mitt. d. V. d. El.-W. — Mitteilungen d. Verbands d. Elektrizitäts-Werke.
P. Am. E. E. — Proceedings of the Am. Institute of. El. Eng.
Refrig. Eng. — Refrigerating Engineer.
R. G. E. — Revue générale de l'Electricité.
S. S. W. — Siemens Schuckert Werke.
St. u. E. — Stahl und Eisen.
S. Z. — Siemens Zeitschrift.
V. D. I. — Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure.
Werkz. Masch. — Werkzeug-Maschine.
W. T. — Werkstattstechnik.
Zeit. f. Met. — Zeitschrift für Metallkunde.

О Г Л А В Л Е Н И Е.

	Стр.
Принятые основные условные обозначения	3
Глава V. Типы двигателей	5
§ 1. Классификация типов	—
§ 2. Защита двигателей путем „закрытия“	6
§ 3. Защита двигателей изоляцией	20
§ 4. Способы вентиляции двигателей	21
§ 5. Расположение вала	24
§ 6. Форма станины двигателей	25
§ 7. Число и типы подшипников	43
§ 8. Число оборотов двигателей	49
§ 9. Детали	57
§ 10. Общие основания для выбора типа двигателей	61
Глава VI. Определение мощности двигателей в отношении нагрева	72
§ 1. Общие основания	—
§ 2. Процесс нагревания и охлаждения	74
§ 3. Определение величины T	82
§ 4. Продолжительная работа (нагрузка)	88
§ 5. Кратковременная работа (нагрузка)	89
§ 6. Прерывистая работа	92
§ 7. Способ среднего квадратичного тока	115
§ 8. Способ средней квадратичной мощности	119
§ 9. Выбор двигателя по специальным каталогам „временных мощностей“	125
§ 10. Выбор двигателя по специальным каталогам „прерывистых мощностей“	128
§ 11. Сравнение двух способов выбора двигателя по каталогам „временных“ и повторно-кратковременных „прерывистых“ мощностей	146
§ 12. Способ выбора мощности по специальным таблицам, составленным для определенных типов двигателей (закрытых крановых) определенными фирмами	152
Глава VII. Выбор реостатов и аппаратуры	159
§ 1. Общие основания для выбора реостатов	—
§ 2. Плоские металлические реостаты	171
§ 3. Цилиндрические реостаты-контроллеры	180
§ 4. Автоматическое управление пуском	185
§ 5. Выбор сопротивления и его монтажа. Наполнение реостатов (Füllung). Пусковая работа	193
§ 6. Методы расчета пусковых реостатов	202
§ 7. Жидкостные реостаты	212
§ 8. Выбор привода реостатов	222
§ 9. Пусковая аппаратура для короткозамкнутых и синхронных двигателей	226
§ 10. Регулировочные реостаты и „кнопочное“ управление	231
Глава VIII. Выбор электрического привода	244
§ 1. Общие основания	—
§ 2. Системы привода и их отдача	246
§ 3. Механические передачи	255
	603

§ 4.	Механические передачи для регулирования скорости	276
§ 5.	Непосредственное соединение	283
§ 6.	Групповой и одиночный приводы	288
§ 7.	Подсчет мощности электродвигателей	294
§ 8.	Сравнение одиночного и группового приводов в производственном отношении	302
§ 9.	Метод выбора электрического привода на частном примере привода для металлообрабатывающего станка	305
§ 10.	Общее сравнение систем электрического привода	336
Глава IX.	Выбор системы тока и напряжения	348
§ 1.	Выбор системы тока	—
§ 2.	Выбор напряжения	360
§ 3.	О способах построения графиков нагрузки	365
Глава X.	Коэффициент мощности и способы его улучшения в фабрично-заводских установках	367
§ 1.	Причина возникновения сдвига фаз	—
§ 2.	Влияние коэффициента мощности на использование проводов сети, генераторов и первичных двигателей станции и трансформаторов подстанции	374
§ 3.	Меры борьбы с низким коэффициентом мощности и способы местного его улучшения	385
§ 4.	Способы централизованной и групповой компенсации	397
§ 5.	Статические конденсаторы	398
§ 6.	Вращающиеся конденсаторы	406
§ 7.	Одновременное использование синхронной машины в качестве двигателя и фазокомпенсатора	415
§ 8.	Синхронизированные асинхронные двигатели	426
§ 9.	Фазокомпенсаторы	435
§ 10.	Компенсированные асинхронные двигатели	466
§ 11.	Сравнение различных способов компенсации	475
Список литературы		487

ВАЖНЕЙШИЕ ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ.

Стр.	С т р о к а		Напечатано:	Должно быть:
	Сверху	Снизу		
3	3 (слева)	—	$A = \mu. Q$	$A = \mu. F$
3	—	6 (справа)	$I \frac{dw}{dt}$	$J \frac{dw}{dt}$
3	—	16 (справа)	инерции.	инерции. (Но J — джоуль.)
4	—	3.	двигается	двигателя
47	—	6	(0,3 РН)	(0,3 НР)
			(3 РН)	(3 НР)
			(3,0 РН)	(30 НР)
115	Фиг. 315 Пропущено обозначение		$\frac{T}{H}$ (на оси абсцисс).	
141	—	5	p_* =	p_{*2} =
143	13	—	$975 \frac{P}{h}$	$975 \frac{P}{n}$
200	1	—	72	72 sec
			90	90 sec
200	12—13	—	$Pthn l$	$Pthn$ (литров)
239	7	—	последний	связанным
275	11	—	0,80—0,90	0,90—0,80
289	2	—	ними	ним
316	фиг. 467	—	D_{k+1}	D_{*+1}
317	—	2	Перенести в числитель — 1, который стоит рядом с чертой.	
319	—	18	328	326
399	—	3	После 10^9 в середине формулы пропустить знак равенства.	
406	7	—	(кривая II)	(кривая I)
420	11	—	получила	получил на
423	11	—	К выраж. $M_m \equiv V$ пропущено примечание:	
„Практически. Теоретически же, как указано на стр. 482 ч. I, можно считать $M_m \equiv V^2$ при условии $\lambda = \text{const}$, что может быть достигнуто лишь искусственно и практически не имеет места“.				
442	4	—	P_k'	P_k''
490	8	—	металлообразных	металлообрабатывающих
491	6	—	жилы	пилы
491	—	18	Parre	Purre
495	—	13	496	494

В части I, стр. 475, 10—11 строки сверху, вместо слов: „неосвещены в литературе“ следует читать: „экспериментально не освещены в русской литературе“.