

421.311  
Библиотека  
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

В. И. КЛЮЧЕВ



# ВЫБОР ЭЛЕКТРО- ДВИГАТЕЛЕЙ

ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие сведения . . . . .	3
2. Номинальные данные двигателей . . . . .	7
3. Нагревание и охлаждение двигателей . . . . .	9
4. Номинальные режимы работы двигателей . . . . .	14
5. Нагрузки двигателей. Понятие о перегрузочной способности . . . . .	22
6. Выбор двигателей для механизмов длительного режима работы . . . . .	39
7. Выбор двигателей для механизмов повторно-кратковременного и кратковременного режимов работы . . . . .	52
8. Особенности выбора асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором . . . . .	63
Приложения . . . . .	76
Литература . . . . .	81

---

621.311  
K52

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

---

Выпуск 127

В. И. КЛЮЧЕВ

12500

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
МЕХАНИЗМОВ

Издание второе



ИЗДАТЕЛЬСТВО „ЭНЕРГИЯ“

МОСКВА 1964 ЛЕНИНГРАД

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Большаков Я. М., Васильев А. А., Долгов А. Н., Ежков В. В.,  
Каминский Е. А., Мандрыкин С. А., Синьчугов Ф. И.,  
Смиринов А. Д., Устинов П. И.

---

ЭЭ-3-3

УДК 621.313.13.004.14

К 52

В брошюре излагаются методы выбора электродвигателей к производственным механизмам. Приведены сведения об основных свойствах и особенностях электрических двигателей, режимах их работы, определении нагрузок электроприводов. Основные положения поясняются примерами расчета.

В настоящем, втором, издании брошюра переработана в направлении возможного дальнейшего упрощения расчетов.

Брошюра рассчитана на электромонтеров промышленных предприятий, специализирующихся по эксплуатации электроприводов. Ряд сведений может представить интерес и для более широкого круга читателей — электриков промышленных предприятий.

---

*Ключев Владимир Иванович*

**Выбор электродвигателей для производственных механизмов.**

Изд. 2-е. М. — Л., издательство «Энергия», 1964.

с. с черт. (Б-ка электромонтера. Вып. 127)

Тематический план 1964, № 195

Редактор Э. Я. Бранденбургская

Техн. редактор О. П. Печенкина

---

Сдано в набор 6/II 1964 г.

Подписано к печати 31/III 1964 г.

Т-04252 Бумага 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>

4,1 печ. л.

Уч.-изд. л. 4,6

Тираж 25 000 экз.

Цена 16 коп.

Заказ 1064

---

Московская типография № 10 Главполиграфпрома  
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати  
Шлюзовая наб., 10.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Известно, что существует несколько принципиально различных видов электрических двигателей. Прежде всего по роду тока их разделяют на двигатели постоянного и переменного тока.

Двигатели постоянного тока могут иметь различные способы возбуждения: независимое, смешанное или последовательное. Способ возбуждения определяет электромеханические свойства двигателя, наиболее важные для приводимого им в движение производственного механизма. Эти свойства проявляются в зависимости скорости вращения двигателя от нагрузки на валу, которую принято называть механической характеристикой. Механические характеристики двигателей независимого, смешанного и последовательного возбуждения представлены на рис. 1.

Двигатели с независимым возбуждением, или, как их иногда называют, шунтовые, при изменении нагрузки на валу в широких пределах мало изменяют свою скорость вращения (прямая 1 на рис. 1). Поэтому их применяют в тех случаях, когда важно, чтобы рабочая скорость механизма оставалась примерно постоянной как при работе вхолостую, так и при любой рабочей нагрузке.

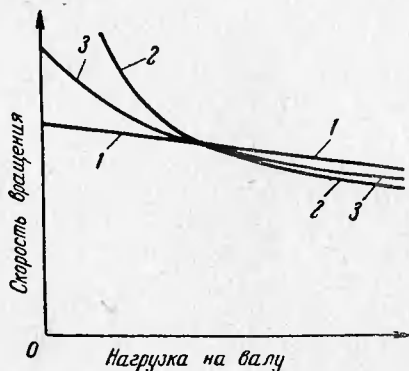


Рис. 1. Механические характеристики двигателей постоянного тока.

Важнейшим достоинством двигателя с независимым возбуждением является также возможность плавного регулирования скорости в широких пределах и без больших затрат мощности. Такое регулирование осуществляется изменением его тока возбуждения (ослаблением поля) или изменением напряжения на зажимах якоря, например с помощью отдельного управляемого генератора (система Г—Д). Двигатель с независимым возбуждением находит широкое применение в наиболее ответственных случаях, когда требуются высокие регулировочные свойства электропривода.

Двигатели с последовательным возбуждением (серийные) отличаются тем, что их скорость вращения в большей степени зависит от нагрузки на валу (кривая 2 на рис. 1). При малых нагрузках скорость велика, а при увеличении нагрузки она сильно снижается. Работа такого двигателя вхолостую недопустима, так как при этом его скорость увеличивается до значений, при которых возможны механические повреждения якоря (как говорят, двигатель «идет вразнос»). Другой важной особенностью двигателя с последовательным возбуждением является его способность выдерживать относительно большие перегрузки, чем двигатель с независимым возбуждением. Поэтому двигатель с последовательным возбуждением находит широкое применение на транспорте (трамвай, троллейбус, электровозы), на подъемных механизмах наиболее ответственных кранов и в других аналогичных случаях.

Двигатели смешанного возбуждения (компаундные) занимают по своим свойствам промежуточное положение между первыми двумя видами двигателей постоянного тока (кривая 3 на рис. 1).

Двигатели переменного тока также имеют несколько разновидностей. Наиболее важными из них являются двигатели трехфазного тока: асинхронные с короткозамкнутым или фазным ротором (с кольцами) и синхронные.

В сравнении с двигателями постоянного тока асинхронные двигатели проще, дешевле, надежнее в эксплуатации и не требуют преобразования трехфазного переменного тока, получаемого непосредственно от заводских сетей, в постоянный ток.

Наиболее распространенным на промышленных предприятиях является асинхронный двигатель трехфазного тока с короткозамкнутым ротором. Этот двигатель при всей своей простоте обладает рядом специфических особенностей, которым в последующем изложении уделено особое внимание.

Асинхронный двигатель с фазным ротором также находит широкое промышленное применение. Зажимы роторной обмотки в этом двигателе выведены на кольца, что дает возможность изменять условия пуска, реверса и торможения или регулировать скорость, вводя в цепь ротора добавочные пусковые, тормозные или регулировочные сопротивления.

Скорость вращения асинхронных двигателей в нормальном режиме работы мало зависит от нагрузки на валу. В этом отношении они аналогичны двигателям постоянного тока с независимым возбуждением (см. рис. 1). Однако возможности асинхронных двигателей в отношении регулирования скорости весьма ограничены. Поэтому асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в нормальном исполнении, как правило, находит применение в электроприводах механизмов, не требующих регулирования скорости. В специальном многоскоростном исполнении этот двигатель обеспечивает ступенчатое регулирование скорости (практически не больше четырех ступеней).

Синхронные двигатели промышленного применения используются в нереверсивных нерегулируемых электроприводах, работающих длительно без частых пусков и остановок. Как правило, они выпускаются на мощности выше 50 квт. Выбор столь крупных двигателей в практике электриков промышленных предприятий встречается весьма редко. В связи с ограниченным объемом брошюры особенности выбора синхронных двигателей в ней не рассматриваются.

Приведенный краткий обзор охватывает лишь основные разновидности электрических двигателей, наиболее широко применяющихся на промышленных предприятиях. Выбор электродвигателей по роду тока является сложной задачей, которая решается в процессе проектирования электропривода. В условиях же эксплуатации выбор двигателя, как правило, связан с заменой двигателя, установленного на механизме. Поэтому в дальней-

шем мы будем считать известными род тока, способ возбуждения двигателя постоянного тока или разновидность двигателя переменного тока. Эти сведения указаны на заводской табличке (щитке) заменяемого двигателя.

В различных производственных помещениях складываются различные условия работы электродвигателей в отношении воздействия на них окружающей среды. В сухих помещениях с атмосферой, не загрязненной пылью, едкими парами или газами, обмотки двигателей и коллекторы машин постоянного тока не подвергаются никаким вредным воздействиям. Напротив, в помещениях с повышенной влажностью, запыленностью и в особенности при наличии едких паров или газов обмотки двигателей и их коллекторы необходимо защищать от вредного воздействия окружающей среды. Особые условия работы двигателей складываются в так называемых взрывоопасных помещениях, где возникновение электрической искры может вызвать взрыв. В этом случае нужно защищать окружающую среду от возможного взрыва при появлении электрической искры внутри двигателя.

Учитывая это, двигатели изготавливают в различных исполнениях по способу защиты от воздействия окружающей среды. Наиболее распространены двигатели в защищенном, закрытом и взрывонепроницаемом исполнениях. Защищенные двигатели предназначаются для работы в сухих непыльных помещениях. Закрытые двигатели устанавливаются в помещениях с повышенной влажностью с атмосферой, загрязненной пылью с металлическими включениями, испарениями керосина или масла. Взрывонепроницаемые двигатели имеют специальную конструкцию корпуса, способную выдержать взрыв газа внутри машины и исклЮчающую при этом выброс пламени и раскаленных газов в окружающую среду. Они предназначаются для использования во взрывоопасных помещениях.

Эти положения необходимо иметь в виду при выборе двигателя к производственному механизму. Нежелательно, а иногда и недопустимо устанавливать взамен закрытого двигателя защищенный и совершенно недопустимо устанавливать взамен взрывонепроницаемого двигателя закрытый или защищенный,

Наконец, при выборе двигателей следует обращать внимание на их исполнение по способу монтажа (горизонтальное или вертикальное расположение вала двигателя, крепление на лапах или фланцевое и т. п.). Выбираемый двигатель должен иметь тот же способ установки, крепления и соединения с производственным механизмом, что и заменяемый.

Основой выбора конкретного двигателя являются его паспортные (номинальные) данные, указываемые завод-изготовителем на щитке машины. Соответствие этих данных условиям работы двигателя на производственном механизме и определяет правильность его выбора.

## 2. НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

На щитке машины указывается номинальное напряжение, на которое она рассчитана. Очевидно, это напряжение должно полностью соответствовать напряжению сети, от которой двигатель будет питаться.

Для асинхронных двигателей часто приводятся два значения напряжения, соответствующие двум схемам включения обмоток статора. Например, если на щитке машины указаны напряжения 220/380 в и соединение обмотки статора  $\Delta/Y$ , то при напряжении между фазами питающей линии 220 в обмотка статора должна включаться в треугольник (рис. 2, а), а при 380 в — звезду (рис. 2, б).

У двигателей постоянного тока с независимым или смешанным возбуждением напряжения питания якоря и обмотки возбуждения могут быть различной величины, о чем имеются указания на щитке машины.

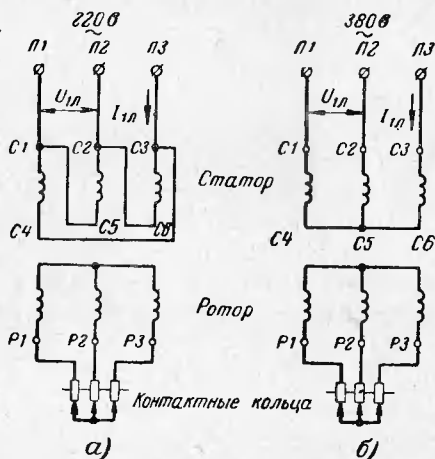


Рис. 2. Соединение статорной обмотки асинхронного двигателя в треугольник и звезду.

На щитке машины также указывается номинальная скорость вращения электродвигателя. Номинальная скорость вращения является одним из важных параметров как электродвигателя, так и производственного механизма. Поэтому при выборе двигателя обычно следует обеспечивать равенство номинальных скоростей вращения выбираемого двигателя и производственного механизма.

Для двигателей переменного тока на щитке указывается номинальная частота тока питающей сети в периодах в секунду ( $гц$ ). Стандартной промышленной частотой сети переменного тока в Советском Союзе является частота  $f=50$   $гц$ . Поэтому подавляющее большинство двигателей переменного тока, выпускаемых нашей промышленностью, рассчитано на работу от сети с частотой 50  $гц$ .

Для асинхронных и синхронных двигателей трехфазного тока частота сети определяет скорость вращения магнитного поля машины (синхронную скорость вращения)  $n_0$ :

$$n_0 = \frac{60f}{p}, \quad (1)$$

где  $f$  — частота тока питающей сети,  $гц$ ;  
 $p$  — число пар полюсов двигателя.

Число полюсов  $2p$  асинхронных машин, как правило, указывается последней цифрой в обозначении типа машины. Поэтому синхронную скорость асинхронного двигателя можно подсчитать по паспортным данным. Например, синхронная скорость вращения двигателя типа АО 51-6  $f=50$   $гц$ ;

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин.}$$

Так как число пар полюсов может выражаться только числами натурального ряда  $p=1, 2, 3$  и т. д., при промышленной частоте синхронная скорость двигателя может иметь лишь вполне определенные значения: 3000, 1500, 1000, 750 об/мин и т. д.

Номинальная скорость вращения асинхронного двигателя, указанная на щитке, всегда несколько меньше синхронной, так как при увеличении нагрузки скорость

вращения ротора уменьшается. Относительное снижение скорости в сравнении с синхронной характеризуется так называемым скольжением ротора

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot 100\%$$

где  $n$  — скорость вращения ротора, *об/мин.*

Скольжение увеличивается с возрастанием нагрузки на валу. Номинальной скорости  $n_n$  соответствует номинальное скольжение  $s_n$ . Для большинства двигателей  $s_n = (2 \div 5)\%$ , причем меньшие значения соответствуют более мощным двигателям. У так называемых двигателей с повышенным скольжением  $s_n = (8 \div 12)\%$ .

Высокоскоростные двигатели специального исполнения для электрошпинделей, электроинструмента, центрифуг, авиационные двигатели и т. п. выпускаются с номинальной частотой, в несколько раз превосходящей промышленную (200—400 *гц*). Такие двигатели включать непосредственно на напряжение заводской сети с частотой 50 *гц* недопустимо. Для их питания должны устанавливаться специальные преобразователи частоты.

Указываемые на щитке двигателя номинальные значения мощности, тока, а также номинальный режим работы характеризуют нормальную нагрузку двигателя, на которую он рассчитан по условиям нагревания.

### 3. НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Приводя в движение производственный механизм, электродвигатель совершает полезную работу по преодолению сил сопротивления, обусловленных полезной нагрузкой на его рабочем органе, а также сил трения в передачах и движущихся частях механизма. Количество полезной работы, совершаемое в единицу времени (в секунду), называется полезной мощностью  $P_2$  или мощностью на валу двигателя.

Энергию, необходимую для совершения механической работы, двигатель получает из электрической сети, к которой он подключен. Количество электрической энергии, потребляемой двигателем из сети в секунду, называется потребляемой мощностью. Потребляе-

мую мощность  $P_1$  для двигателя постоянного тока можно подсчитать по формуле

$$P_1 = 0,001 U_H I_H \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $U_H$  — напряжение на зажимах двигателя, *в*;  
 $I_H$  — ток, потребляемый двигателем из сети, *а*.

Для асинхронного двигателя (рис. 2)

$$P_1 = 0,001 \sqrt{3} U_{1л} I_{1л} \cos \varphi \text{ кВт}, \quad (3)$$

где  $U_{1л}$  — междуфазное (линейное) напряжение на зажимах двигателя, *в*;

$I_{1л}$  — ток, потребляемый двигателем из сети (линейный), *а*;

$\cos \varphi$  — коэффициент мощности двигателя.

Преобразование электрической энергии в механическую работу неизбежно сопровождается потерями ее

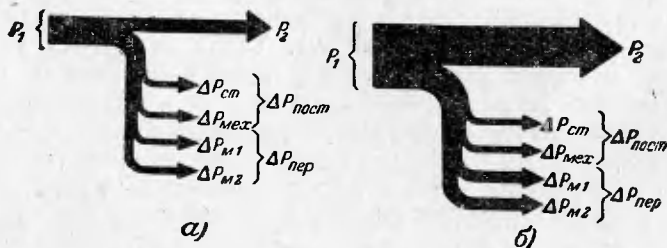


Рис. 3. Энергетические диаграммы асинхронного двигателя.

в двигателе. Поэтому потребляемая мощность всегда больше, чем мощность на валу, а разность их равна мощности потерь:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \text{ кВт.}$$

Мощность потерь характеризует количество энергии, которое теряется непосредственно в двигателе за 1 сек (если отсутствуют внешние добавочные сопротивления).

Рассмотрим энергетическую диаграмму асинхронного двигателя, приведенную на рис. 3,а. Потребляемая из сети переменного тока мощность  $P_1$  частично реализуется в виде полезной мощности  $P_2$ , а частично теряется в самом двигателе в виде мощности потерь в стали

статора и ротора  $\Delta P_{\text{ст}}$ , механических потерь  $\Delta P_{\text{мех}}$ , связанных с трением в подшипниках и наличием вентилятора на валу двигателя, а также потерь в сопротивлениях обмоток статора  $\Delta P_{\text{м1}}$  и ротора  $\Delta P_{\text{м2}}$ .

Потери в стали возникают вследствие непрерывных периодических изменений магнитного потока машины, обусловленных изменениями переменного тока. Для уменьшения этих потерь статор и ротор асинхронного двигателя выполняются шихтованными, т. е. набранными из тонких стальных пластин, электрически изолированных друг от друга изоляционным покрытием.

Механические потери и потери в стали весьма мало зависят от нагрузки на валу двигателя, поэтому их принято считать постоянными потерями. Потери в меди обмотки зависят от квадрата тока  $I$ , протекающего по обмотке с сопротивлением  $r$ :

$$\Delta P_{\text{м}} = I^2 r.$$

При увеличении нагрузки на валу двигателя увеличивается полезная мощность  $P_2$ , а значит, и потребляемая мощность  $P_1$ . Это влечет за собой в соответствии с формулами (2) и (3) увеличение тока, проходящего по обмоткам двигателя, а следовательно, и потерь в меди двигателя  $\Delta P_{\text{м1}}$  и  $\Delta P_{\text{м2}}$ . Поэтому потери в меди принято называть переменными потерями.

Энергетическая диаграмма, соответствующая увеличенной в сравнении с рис. 3,а нагрузке, приведена на рис. 3,б. На основании этой диаграммы можно сделать важный вывод, что суммарная мощность потерь в двигателе  $\Delta P$  определяется нагрузкой на его валу, увеличиваясь при ее возрастании за счет увеличения переменных потерь.

Без большой погрешности можно считать, что потери энергии целиком выделяются в двигателе в виде тепла. Рассмотрим, какими тепловыми процессами сопровождается работа двигателя с некоторой нагрузкой на валу, если при включении двигатель имел температуру, равную температуре окружающей среды  $t_{\text{о.с.}}^{\circ}$ .

Выделяющееся в двигателе в течение каждой секунды количество тепла  $0,24 \Delta P$  ккал/сек вызывает увеличение его температуры. Очевидно, чем больше мощность потерь  $\Delta P$ , тем быстрее должна нарастать температура двигателя.

С другой стороны, нагретый двигатель, как и любое другое нагретое тело, отдает тепло окружающей среде, т. е. охлаждающему воздуху, имеющему более низкую температуру  $t_{o.c}^0$ , чем температура двигателя  $t^0$ . Чем больше разница между этими температурами, тем больше количество тепла  $Q_{o.c}$ , отдаваемое в окружающую среду в течение каждой секунды:

$$Q_{o.c} = A(t^0 - t_{o.c}^0) \text{ ккал/сек}, \quad (4)$$

где  $A$  — теплоотдача двигателя, *ккал/град·сек*. Теплоотдача двигателя равна количеству тепла, отдаваемого двигателем в окружающую среду в течение 1 сек при разнице в температурах  $t^0$  и  $t_{o.c}^0$ , равной  $1^\circ\text{C}$ .

Из формулы (4) следует, что процесс нагревания двигателя сопровождается непрерывным увеличением количества тепла, отдаваемого в окружающую среду. В связи с этим темп нарастания температуры двигателя по мере его нагрева постепенно уменьшается. При некоторой температуре двигателя  $t_{уст}^0$  все выделяющееся в нем за счет потерь тепло будет полностью отдаваться в окружающую среду. Приравнявая количество тепла, выделяющееся в двигателе в течение 1 сек, количеству тепла, отдаваемому двигателем за то же время в соответствии с формулой (4), можно записать

$$0,24\Delta P = A(t_{уст}^0 - t_{o.c}^0).$$

Очевидно, при этом наступит тепловое равновесие и дальнейший рост температуры двигателя прекратится. Из последнего равенства легко определить установившуюся температуру двигателя:

$$t_{уст}^0 = \frac{0,24\Delta P}{A} + t_{o.c}^0. \quad (5)$$

Таким образом, нагрузка на валу двигателя определяет установившуюся температуру двигателя при данной температуре окружающей среды.

Из формулы (5) следует, что при прочих равных условиях температура, до которой нагревается двигатель, будет тем выше, чем меньше теплоотдача  $A$ .

Поэтому при выборе двигателей необходимо учитывать условия их вентиляции, так как ухудшение вентиляции уменьшает теплоотдачу.

На рис. 4 графически изображена зависимость температуры двигателя от времени  $t$  при работе с небольшой нагрузкой на валу (кривая 1). При увеличении на-

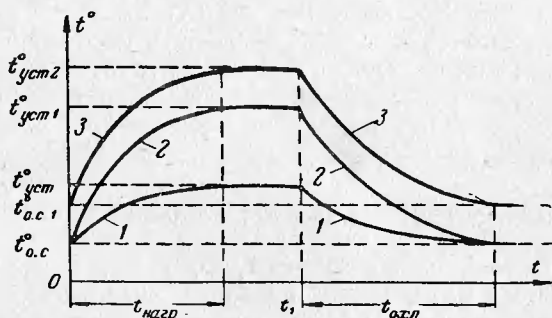


Рис. 4. Зависимость температуры двигателя  $t^\circ$  от времени  $t$  при нагревании и охлаждении двигателя.

грузки увеличивается мощность потерь  $\Delta P$  и возрастает установившаяся температура двигателя  $t_{уст1}^\circ$  (кривая 2). Увеличение температуры окружающей среды  $t_{о.с}^\circ$  при той же повышенной нагрузке вызывает дальнейшее увеличение температуры двигателя до значения  $t_{уст2}^\circ$  (кривая 3).

Указанная на рис. 4 продолжительность нагревания двигателя  $t_{нагр}$  зависит от размеров двигателя: чем больше размеры двигателя, тем продолжительность нагревания больше. Двигатели небольшой мощности (порядка нескольких киловатт) нагреваются до установившейся температуры в течение нескольких десятков минут. Время нагревания мощных двигателей больше — порядка нескольких часов.

Если в момент времени  $t_1$  (рис. 4) нагретый до установившейся температуры двигатель отключить от сети, тепловое равновесие нарушится и температура его будет постепенно уменьшаться в соответствии с кривыми 1, 2 и 3 на рис. 4. Через время  $t_{охл}$  двигатель охладится до

температуры окружающей среды  $t_{\text{о.с.}}^{\circ}$ . Это время обычно больше, чем время нагревания  $t_{\text{нагр}}$ , так как большинство двигателей имеет вентилятор, расположенный непосредственно на их валу, и условия охлаждения при остановке двигателя сильно ухудшаются. Отсутствие вентиляции замедляет отвод тепла и соответственно увеличивает время охлаждения двигателя.

Для двигателей с независимой вентиляцией  $t_{\text{нагр}} \approx \approx t_{\text{охл}}$ , так как охлаждающий их вентилятор приводится во вращение вспомогательным двигателем небольшой мощности, который продолжает работать и после остановки основного двигателя.

#### 4. НОМИНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ

Изготовление двигателя требует определенных затрат ценных материалов, и желательно использовать их как можно полнее. Иными словами, желательно, чтобы каждый двигатель мог работать с возможно большей нагрузкой, развивая возможно большую полезную мощность  $P_2$ .

Однако увеличение нагрузки двигателя сопровождается увеличением температуры его частей. При чрезмерно больших температурах нормальные условия работы двигателя нарушаются. Наиболее чувствительным к повышению температуры элементом является изоляция обмоток двигателя. Чем выше рабочая температура, тем быстрее стареет и разрушается изоляция. Поэтому для каждого изоляционного материала максимальная рабочая температура строго ограничена значением, при котором обеспечивается требуемый срок службы его.

Этим ограничивается максимально допустимая температура двигателя, которая в зависимости от вида изоляции обычно лежит в пределах  $105-125^{\circ}\text{C}$ . Тем самым ограничивается и максимально допустимая нагрузка на валу по условиям нагрева двигателя.

Приведенные на щитке двигателя номинальные значения мощности  $P_n$ , тока  $I_n$  и скорости вращения  $n_n$  соответствуют номинальной нагрузке на валу, при которой двигатель, работая в номинальном режиме, при температуре окружающей среды  $+35^{\circ}\text{C}$  имеет максимально допустимую температуру.

Рассмотрим это определение. Прежде всего в нем оговаривается температура окружающей среды, которой соответствуют номинальные данные двигателя. Действительно, в соответствии с формулой (5) температура двигателя  $t_{уст}^{\circ}$  зависит не только от нагрузки на валу, но и от температуры окружающей среды  $t_{oc}^{\circ}$ . Из определения следует, что двигатель можно нагружать указанной в паспорте номинальной нагрузкой, если температура окружающей среды не превосходит  $35^{\circ}\text{C}$ . При более высокой температуре окружающей среды во избежание недопустимого перегрева двигателя нагрузку его следует снижать.

В определении упоминается указываемый на щитке двигателя номинальный режим работы, на который он рассчитан. На этом важном положении остановимся несколько подробнее.

Сравним условия работы одного и того же двигателя при использовании его для привода трех различных механизмов: вентилятора, осуществляющего вентиляцию цеха, механизма передвижения мостового крана и механизма дистанционного управления вентилем на автоматизированной насосной подстанции.

Двигатель вентилятора, будучи включен в начале смены работает длительно до конца ее, а иногда и значительно дольше. Продолжительность работы двигателя в этом случае больше, чем продолжительность нагревания  $t_{нагр}$  (рис. 5,а). Двигатель успевает нагреться до установившейся допустимой температуры  $t_{уст} = t_{доп}$ , и дальнейший рост температуры прекращается.

Такой режим работы называется длительным.

Двигатель передвижения крана включается на время перемещения моста с грузом на крюке, затем отключается от сети и в его работе наступает пауза, во время которой груз опускается. После подъема пустого крюка двигатель моста вновь включается на время движения моста к месту загрузки. У места загрузки он отключается, и наступает пауза (спуск крюка, подъем груза), после которой начинается новый цикл работы механизма и его двигателя, аналогичный рассмотренному. Такие циклы могут повторяться непрерывно в течение длительного времени.

В этом случае продолжительность работы двигателя в каждом цикле значительно меньше, чем время  $t_{\text{нагр}}$ , за которое двигатель достигает установившейся температуры. Поэтому за время, в течение которого двигатель включен, его температура не успевает сильно возрасти.

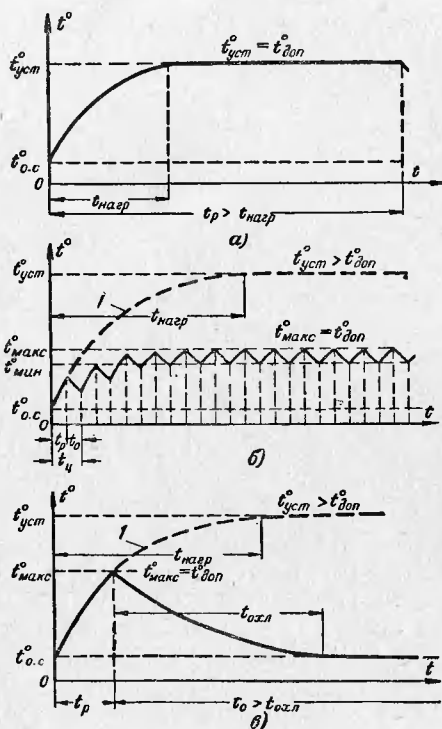


Рис. 5. Зависимость температуры двигателя  $t^\circ$  от времени  $t$  в различных режимах работы с постоянной нагрузкой на валу.

а — при длительном режиме; б — при повторно-кратковременном режиме; в — при кратковременном режиме.

Во время паузы двигатель охлаждается и его температура падает, стремясь сравняться с температурой окружающей среды. Но по той же причине за короткий промежуток паузы она не успевает сильно снизиться и не достигает температуры окружающей среды.

Если в начале работы двигатель имел температуру окружающей среды, то при таком режиме температура его во времени будет изменяться по кривой  $t^{\circ} = f(t)$ , приведенной на рис. 5,б. На этом рисунке периоды работы двигателя, когда его температура повышается, обозначены  $t_p$ , а периоды пауз, когда температура снижается,  $t_0$ . Из графика видно, что через некоторое время после начала работы наступит режим, при котором температура двигателя будет колебаться между постоянными значениями  $t_{\max}^{\circ}$  и  $t_{\min}^{\circ}$ . Этот режим подобен режиму работы с установившейся температурой  $t_{\text{уст}}^{\circ}$  на рис. 5,а, так как дальнейший рост температуры двигателя прекращается.

Такой режим работы двигателя называется повторно-кратковременным.

12580  
Обратимся к рассмотрению условий работы двигателя привода механизма для дистанционного управления вентилем. Предположим, что этот вентиль должен быть открыт в течение дня и закрыт на несколько часов ночью. Следовательно, его двигатель будет включаться 2 раза в течение суток: ночью на время, необходимое для закрытия вентилей, и утром на время, необходимое для его открытия. Операции «открыть» и «закрыть» осуществляются в течение десятков секунд каждая, а все остальное время суток двигатель отключен от сети. Ясно, что в течение коротких промежутков включения двигателя заведомо не успеет нагреться до установившейся температуры, а продолжительности пауз достаточны для полного охлаждения его до температуры окружающей среды (см. рис. 5,в).

Такой режим работы двигателя называется кратковременным.

Нетрудно видеть, что допустимая по нагреву нагрузка одного и того же двигателя во всех трех рассмотренных режимах различна. В длительном режиме она имеет наименьшее значение, так как температура двигателя достигает установившегося значения, определяемого нагрузкой на валу.

При повторно-кратковременных и кратковременных режимах можно допускать большие нагрузки, учитывая, что двигатель не достигнет установившейся температуры  $t_{\text{уст}}^{\circ}$

и температура двигателя  $t_{\text{макс}}^{\circ}$  не превысит допустимой температуры  $t_{\text{доп}}^{\circ}$ .

Номинальные значения мощности, тока двигателя и соответствующие значения номинальной скорости вращения указываются заводом на щитке двигателя для вполне определенного номинального режима работы и действительны только для этого режима.

У двигателей, предназначенных для длительного режима работы, номинальные данные соответствуют длительно допустимой нагрузке, а номинальный режим работы на щитке обозначается «длит».

Отечественная электропромышленность выпускает ряд серий двигателей переменного и постоянного тока, предназначенных для длительного режима работы.

Наибольшее распространение на промышленных предприятиях в настоящее время получили асинхронные двигатели единой серии А. Двигатели этой серии охватывают диапазон мощностей от 0,6 до 100 квт.

Основное исполнение единой серии — защищенные (А) и закрытые обдуваемые (АО) двигатели с короткозамкнутым ротором общего применения. Аналогичные двигатели в облегченной (алюминиевой) оболочке имеют обозначения соответственно АЛ и АОЛ.

Наряду с основным исполнением имеется ряд специализированных разновидностей двигателей с короткозамкнутым ротором. Каждой разновидности присваивается дополнительная буква в обозначении типа, соответствующая ее особенности: П — двигатель с повышенным пусковым моментом, С — с повышенным скольжением, Т — для текстильной промышленности с повышенными энергетическими показателями, В — во встраиваемом исполнении, Ш — в малощумном исполнении, Э — со встроенным механическим тормозом.

Пример обозначения типа двигателя единой серии: АОП 62-4 — асинхронный закрытый обдуваемый двигатель с короткозамкнутым ротором, с повышенным пусковым моментом, шестого габарита, второй длины,  $2p=4$  (четырёхполюсный).

Двигатели единой серии с контактными кольцами выпускаются в защищенном исполнении и имеют буквенное обозначение АК.

Необходимые при выборе двигателей данные, не указываемые на щитках машин, приведены в приложении 1 и каталогах [Л. 5 и 6].

В настоящее время электропромышленность осваивает выпуск асинхронных двигателей новых серий А2 и АО2, которые заменят серии А и АО. Новые серии имеют меньшие размеры и вес.

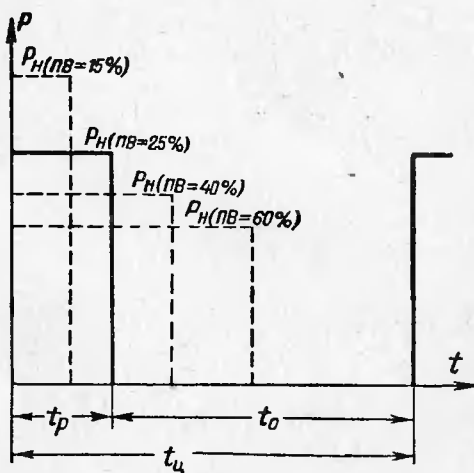


Рис. 6. Номинальные графики нагрузки двигателей для повторно-кратковременного режима.

Из двигателей постоянного тока длительного режима работы наиболее распространенной является серия ПН.

В настоящее время промышленностью осваивается выпуск двигателей единой серии постоянного тока П. Эта серия заменяет серию ПН и все другие выпускавшиеся до недавнего времени серии машин постоянного тока для длительного режима работы.

Двигатели повторно-кратковременного режима работы рассчитываются на цикл работы, приведенный на рис. 6. Согласно этому графику двигатель включается 1 раз за цикл и работает в течение 25% времени цикла с постоянной нагрузкой. Время цикла не должно превышать 10 мин.

Основной характеристикой повторно-кратковременного режима работы является относительная продолжительность включения  $PB$  (рис. 6):

$$PB = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_{\Sigma}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Следовательно, основным номинальным режимом двигателей повторно-кратковременного режима является режим с  $PB=25\%$ . Кроме основного номинального режима ( $PB=25\%$ ), существуют номинальные режимы  $PB=15\%$ ,  $PB=40\%$  и  $PB=60\%$ , показанные на том же графике. Номинальная мощность двигателя увеличивается при уменьшении продолжительности включения, и наоборот.

На щитке двигателя повторно-кратковременного режима в графе «режим работы» указывается его номинальная относительная продолжительность включения, например  $PB=25\%$ .

Кратковременный режим работы характеризуется временем работы  $t_p$  (см. рис. 5,в). Существуют следующие стандартные номинальные режимы:  $t_p=15, 30, 60$  и  $90$  мин. На щитке двигателя кратковременного режима указывается время работы с номинальной мощностью на валу, на которое он рассчитан, например  $15$  мин.

Обратим внимание на то, что если оставить двигатель, рассчитанный на повторно-кратковременный режим, включенным длительно с номинальной нагрузкой, через время  $t_{\text{нагр}}$  его температура достигнет установившегося значения  $t_{\text{уст}}$ , большего, чем  $t_{\text{доп}}^{\circ}$  (см. пунктирную кривую 1 на рис. 5,б), и двигатель может сгореть. Аналогичное явление будет и при продолжительной работе двигателя, рассчитанного на кратковременный режим (см. пунктирную кривую 1 на рис. 5,в).

Для повторно-кратковременного режима работы нашей электропромышленностью выпускаются двигатели краново-металлургических серий МТ, МТВ, МТМ (асинхронные с контактными кольцами), МТК, МТКВ, МТКМ (асинхронные с короткозамкнутым ротором) и ДП (постоянного тока).

Кроме серий МТ, МТК и ДП, в эксплуатации можно встретить крановые и краново-металлургические двига-

тели серий КТ, КТК (трехфазного переменного тока) и МП, КПД, КПДН и т. п. (постоянного тока), выпуск которых в настоящее время прекращен.

Двигатели краново-металлургических серий выпускаются в закрытом исполнении. Основные каталожные данные двигателей типов МТ (МТВ) и МТК (МТКВ) приведены в приложении 2.

Двигатели кратковременного режима имеют, как правило специализированное назначение и крупными сериями не выпускаются.

При выборе двигателей в ряде случаев возникает необходимость определения мощности потерь, выделяющихся в двигателе при различных нагрузках. Потери в двигателе наиболее просто определяются с помощью величины коэффициента полезного действия (к. п. д.) двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}. \quad (7)$$

Отсюда

$$\Delta P = P_2 \frac{1 - \eta}{\eta}. \quad (8)$$

При номинальной нагрузке на валу к. п. д. легко определяется по паспортным данным двигателя. Для асинхронных двигателей он непосредственно указывается на щитке машины. Для машин постоянного тока номинальный к. п. д. может быть подсчитан с помощью формулы

$$\eta_n = \frac{P_n}{U_n I_n}. \quad (9)$$

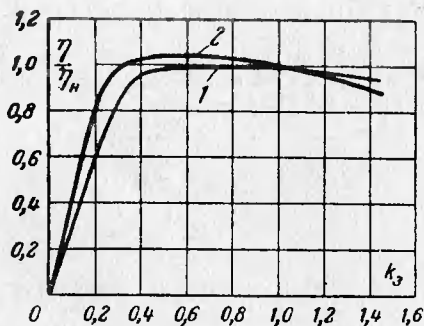


Рис. 7. Кривые  $\frac{\eta}{\eta_n} = f(k_0)$  для определения к. п. д. двигателей при ориентировочных расчетах.

1 — для двигателей длительного режима; 2 — для двигателей повторно-кратковременного режима с ПВ=25%.

При изменении нагрузки на валу к. п. д. не остается постоянным. Значения к. п. д. двигателей при различных нагрузках на валу приведены в каталогах [Л. 6]. Для ориентировочных расчетов значения к. п. д. можно определить с помощью кривых, приведенных на рис. 7, как это выполнено в примере 1.

**Пример 1.** Определить потери в двигателе типа МТК 31-6;  $P_n = 11$  квт при ПВ = 25%;  $\eta_n = 0,81$ , при двух различных нагрузках на валу:

$$P_2 = P_n; \quad P_2 = 0,3P_n.$$

Мощность потерь при номинальной нагрузке

$$\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} = 11 \frac{1 - 0,81}{0,81} = 2,58 \text{ квт.}$$

Коэффициент загрузки двигателя

$$k_z = \frac{P_2}{P_n} = 0,3.$$

По кривой 2 на рис. 7 находим относительное значение к. п. д.:

$$\frac{\eta}{\eta_n} = 0,99.$$

Величина к. п. д. при коэффициенте загрузки  $k_z = 0,3$

$$\eta_{0,3} = \left( \frac{\eta}{\eta_n} \right) \eta_n = 0,99 \cdot 0,81 = 0,802.$$

Мощность потерь при нагрузке на валу, равной 30% номинальной,

$$\Delta P_{0,3} = 0,3P_n \frac{1 - \eta_{0,3}}{\eta_{0,3}} = 0,3 \cdot 11 \frac{1 - 0,802}{0,802} = 0,815 \text{ квт.}$$

## 5. НАГРУЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ. ПОНЯТИЕ О ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ

В приведенных выше рассуждениях указывалось, что полезная мощность  $P_2$ , развиваемая двигателем, зависит от нагрузки на его валу. Установить смысл общего понятия нагрузки, выяснить характер возможных нагрузок на валу двигателя можно с помощью следующих простейших примеров.

На рис. 8,а представлена упрощенная схема привода шпинделя токарного станка. Двигатель вращает шпин-

дель станка с изделием. В результате взаимодействия изделия с резцом возникает усилие резания  $F_z$ , направленное противоположно направлению вращения двигателя. Это усилие создает на валу двигателя противо-

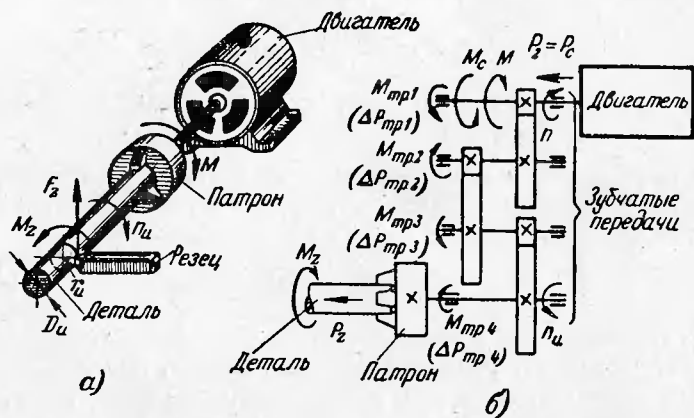


Рис. 8. Усилия и моменты, действующие при работе токарного станка.

а — упрощенная схема резания; б — кинематическая схема.

действующий момент, равный произведению силы  $F_z$  на плечо  $r_{н}$ :

$$M_z = F_z r_{н} = F_z \frac{D_{н}}{2}, \text{ н} \cdot \text{м},$$

где  $F_z$  — усилие резания, н;  
 $r_{н}$  и  $D_{н}$  — соответственно радиус и диаметр изделия, м.

Очевидно, при работе с постоянной скоростью вращения двигатель должен развивать движущий момент  $M$ , полностью уравновешивающий противодействующий момент нагрузки  $M_z$ . Чем больше стружка, снимаемая резцом, тем больше момент нагрузки  $M_z$ , а следовательно, и момент двигателя  $M$ .

Напомним, что работа  $A$ , совершенная силой  $F$  за время  $t$ , численно равна произведению силы на путь  $S$ . Следовательно, мощность резания  $P_z$  связана с усилием резания  $F_z$  соотношением

$$P_z = \frac{A}{t} = \frac{F_z S}{t} = F_z v, \quad (10)$$

где  $v$  — скорость резания, численно равная длине стружки, снимаемой резцом за 1 сек, м/сек.

При вращательном движении мощность выражают через момент и скорость вращения:

$$P_z = \frac{M_z n_x}{9\ 550} \text{ квт},$$

где  $n_x$  — скорость вращения обрабатываемой детали, об/мин.

В рассматриваемом случае мощность на валу двигателя равна полезной мощности резания. Так как  $M = M_z$  и  $n = n_x$ ,

$$P_2 = \frac{Mn}{9\ 550} \text{ квт}, \quad (11)$$

где  $n$  — скорость вращения двигателя, об/мин;

$M$  — момент, развиваемый двигателем, н·м.

В действительности в любом реальном механизме наряду с полезным моментом нагрузки существуют вредные моменты, обусловленные трением в подшипниках и передачах. При этом двигатель на своем валу должен развивать мощность  $P_2$ , равную суммарной мощности всех полезных и вредных нагрузок  $P_c$  (см. рис. 8,б):

$$P_c = P_z + \Delta P_{\text{тр}1} + \Delta P_{\text{тр}2} + \Delta P_{\text{тр}3} + \Delta P_{\text{тр}4} = \frac{P_z}{\eta}, \quad (12)$$

где  $\eta$  — к. п. д. механизма, учитывающий все потери на трение в механизме.

По известной суммарной мощности нагрузки на валу двигателя  $P_c$  можно с помощью формулы (11) определить и суммарный момент нагрузки на этом валу:

$$M_c = 9\ 550 \frac{P_c}{n} \text{ н·м}. \quad (13)$$

Момент, развиваемый двигателем, при этом равен суммарному моменту нагрузки:

$$M = M_c.$$

В рассматриваемом случае все силы и моменты нагрузки являются тормозными, противодействующими вращению. Подъемные механизмы в определенных режимах создают на валу своих двигателей и движущие

моменты нагрузки, способствующие вращению. В этом можно убедиться, рассматривая упрощенную лебедку, представленную на рис. 9. Подвешенный на канате груз  $G$  создает на валу двигателя момент  $M_{гр}$ , равный произведению веса груза на радиус барабана. Этот момент является при спуске груза движущим, так как если не тормозить барабан, груз станет падать, вращая барабан с возрастающей скоростью. Чтобы избежать падения груза и обеспечить спуск его с постоянной ограниченной скоростью, двигатель должен развивать тормозной момент  $M$ , численно равный движущему моменту  $M_{гр}$ . При подъеме груза момент  $M_{гр}$  является тормозным и двигатель должен развивать уравновешивающий его движущий момент  $M$ .

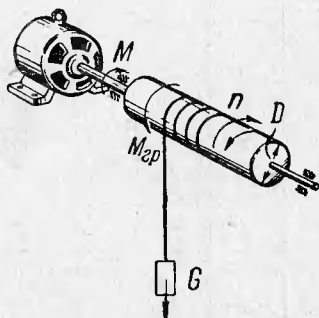


Рис. 9. К определению нагрузки на валу двигателя простейшей подъемной лебедки.

Таким образом, при работе двигатель всегда развивает момент, численно равный суммарному моменту нагрузки на валу и направленный противоположно ему.

Переходя непосредственно к примерам расчета нагрузок, необходимо заметить, что в данном издании брошюры в соответствии с действующим стандартом все расчеты выполняются в системе единиц МКСА. В первом издании, а также в других ранее изданных книгах используется техническая система единиц (МКГС). Размерности важнейших величин в системе МКСА, а также соотношение их с единицами системы МКГС приведены в таблице. Там же приведены размерности ряда величин, не соответствующие основным системам единиц, но используемые в практических расчетах наряду с единицами системы МКСА.

С помощью данных таблицы при необходимости нетрудно перейти от одних единиц к другим. Так, если известен момент нагрузки на валу двигателя в килограммометрах ( $кг \cdot м$ , система МКГС), то его величина в единицах системы МКСА определяется с помощью указанного в таблице соотношения

$$1 \text{ н} \cdot \text{м} = 0,102 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Например, момент нагрузки равен  $46 \text{ кг} \cdot \text{м}$ ; этот же момент в системе МКСА составит

$$M(\text{н} \cdot \text{м}) = \frac{M(\text{кг} \cdot \text{м})}{0,102} = \frac{46}{0,102} = 451 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Величина	Условное обозначение и формула	Наименование единицы	Размерность	Содержит единицы МКГС
<b>1. Основные единицы системы МКСА</b>				
Длина (путь)	$l; S$	метр	$m$	1 $m$
Масса	$m$	килограмм	$kg$	$0,102 \frac{kg \cdot сек^2}{m}$
Время	$t$	секунда	$сек$	1 $сек$
Электрический ток	$I$	ампер	$a$	—
<b>2. Производные единицы</b>				
Скорость	$v = \frac{S}{t}$	метр в секунду	$m/сек$	1 $m/сек$
Ускорение	$a = \frac{v}{t}$	метр в секунду за секунду	$m/сек^2$	1 $m/сек^2$
Сила	$F = ma$	ньютон	$\frac{kg \cdot m}{сек^2} = н$	0,102 $kg$
Работа, энергия	$A = FS$	джоуль	$\frac{kg \cdot m^2}{сек^2} = дж$	0,102 $kg \cdot m$
Мощность	$P = \frac{A}{t} = Fv$	ватт	$\frac{kg \cdot m^2}{сек^3} = \frac{дж}{сек} = вт$	0,102 $\frac{kg \cdot m}{сек}$
Момент силы	$M = Fl$	ньютон, умноженный на метр	$n \cdot m$	0,102 $kg \cdot m$
Напряжение, разность потенциалов	$U$	вольт	$v$	—

тенциалов				
Сопrotивление	$r = \frac{U}{I}$	ом	$\frac{в}{а} = ом$	—
Работа, энергия электрического тока	$A = UIt$	джоуль	$в \cdot а \cdot сек = вт \cdot сек = дж$	0,102 кг·м

### 3. При вращательном движении

Угол поворота	$\varphi$	радиан	1	1
Скорость вращения, угловая скорость	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	радиан в секунду	1/сек	1 $\frac{1}{сек}$
Ускорение	$\varepsilon = \frac{\omega}{t}$	радиан в секунду за секунду	1/сек <sup>2</sup>	1 $\frac{1}{сек^2}$
Мощность	$P = M\omega$	ватт	вт	0,102 $\frac{кг \cdot м}{сек}$
Работа, энергия	$A = M\varphi$	джоуль	дж	0,102 кг·м

### 4. Размерности вне системы единиц, используемые в расчетах

Число оборотов (путь)	$N = 2\pi\varphi$	оборот	об	—
Скорость вращения	$n = \frac{30\omega}{\pi}$	оборот в минуту	об/мин	—
Энергия электрического тока	$A = \frac{UIt}{1000}$	киловатт, умноженный на секунду	1 000 вт·сек = 1 квт·сек	102 кг·м
То же	$A = \frac{UIt}{3,6 \cdot 10^6}$	киловатт-час	3,6 · 10 <sup>6</sup> вт·сек = 1 квт·ч	3,67 · 10 <sup>5</sup> кг·м

Поскольку сила тяжести (грузоподъемность) в практических расчетах задается в килограмм-силах ( $\kappa\Gamma$ , система МКГС) или в тонна-силах ( $T=1000 \kappa\Gamma$ ) ниже в примерах эти размерности сохранены. При этом в соответствии с приведенным соотношением  $1 \text{ квт} = 102 \kappa\Gamma \cdot \text{м/сек}$  мощность удобно вычислять по формуле

$$P = \frac{Gv}{102} \text{ квт.}$$

где  $G$  — сила,  $\kappa\Gamma$ ;  
 $v$  — скорость,  $\text{м/сек}$ .

**Пример 2.** Определить нагрузку на валу двигателя типа АО-51-4  $P_H = 4,5 \text{ квт}$ ;  $n_H = 1440 \text{ об/мин}$ , приводящего во вращение шпиндель токарного станка.

Мощность резания при черновой обработке  $P_{z1} = 3,3 \text{ квт}$ ; к. л. д. станка  $\eta_1 = 0,78$ ; то же при чистовой  $P_{z2} = 2,4 \text{ квт}$ ; к. л. д. станка  $\eta_2 = 0,76$ .

Мощность на валу при черновой обработке по формуле (12)

$$P_{c1} = \frac{P_{z1}}{\eta_1} = \frac{3,3}{0,78} = 4,22 \text{ квт.}$$

Мощность на валу при чистовой обработке

$$P_{c2} = \frac{P_{z2}}{\eta_2} = \frac{2,4}{0,76} = 3,16 \text{ квт.}$$

Значения мощностей резания указываются в справочниках и рассчитываются технологами для номинальной скорости вращения  $n_H$ . Поэтому при определении момента нагрузки на валу двигателя можно не учитывать, что скорость вращения асинхронного двигателя зависит от нагрузки на валу (рис. 11), и принимать ее равной  $n_H$ .

Момент нагрузки на валу двигателя при черновой обработке по формуле (13)

$$M_{c1} = 9550 \frac{P_{c1}}{n_H} = 9550 \frac{4,22}{1440} = 28 \text{ н.м.}$$

То же при чистовой обработке

$$M_{c2} = 9550 \frac{P_{c2}}{n_H} = 9550 \frac{3,16}{1440} = 21 \text{ н.м.}$$

Коэффициент полезного действия станка зависит от нагрузки на шпинделе, так как потери на трение в передачах, так же как и потери в двигателе, можно разделить на постоянные и переменные. При холостом ходе станка ( $P_z = 0$ ) имеют место только постоянные потери. В расчетах принимают, что мощность постоянных потерь в станке составляет 60% мощности потерь в станке при номинальной нагрузке. Номинальная мощность станка равна  $P_{z1}$ . Тогда номинальные потери

$$\Delta P_{ст.н} = P_{c1} - P_{z1} = 4,22 - 3,3 = 0,92 \text{ квт.}$$

Мощность потерь при холостом ходе станка

$$P_{c0} = \Delta P_{ст.н} \approx 0,6 \Delta P_{ст.н} = 0,6 \cdot 0,92 = 0,55 \text{ квт.}$$

Статический момент при холостом ходе

$$M_{c0} = 9550 \frac{P_{c0}}{n_n} = 9550 \frac{0,55}{1440} = 3,65 \text{ н.м.}$$

**Пример 3.** Определить нагрузки на валу двигателя подъемной лебедки мостового крана, кинематическая схема которой приведена на рис. 10. Грузоподъемность лебедки  $G_n = 10 \text{ Т}$ ; грузозахватывающее устройство — крюковая подвеска с подъемным электромагнитом М-41 весом  $G_0 = 1910 \text{ кг}$ ; скорость подъема  $v = 0,33 \text{ м/сек}$ ; к. п. д. лебедки при номинальной нагрузке  $\eta_{л.н} = 0,72$ ; при подъеме магнита  $\eta_{л} = 0,55$ . Двигатель типа МТ 62-10;  $P_n = 45 \text{ квт}$  при ПВ = 25%;  $n_n = 577 \text{ об/мин}$ .

Мощность на валу двигателя при подъеме номинального груза

$$P_{c1} = \frac{G_n v}{102 \eta_{л.н}} = \frac{10000 \cdot 0,33}{102 \cdot 0,72} = 44,8 \text{ квт.}$$

Мощность на валу двигателя при спуске номинального груза меньше, чем при подъеме, так как при этом двигателю помогают подтормаживать опускающийся груз силы трения в передачах:

$$P_{c2} = \frac{G_n v}{102} \eta_{л.н} = \frac{10000 \cdot 0,33}{102} \cdot 0,72 = 23,3 \text{ квт.}$$

Соответствующие моменты нагрузки на валу двигателя:

$$M_{c1} = 9550 \frac{P_{c1}}{n_n} = 9550 \frac{44,8}{577} = 743 \text{ н.м.};$$

$$M_{c2} = 9550 \frac{P_{c2}}{n_n} = 9550 \frac{23,3}{577} = 386 \text{ н.м.}$$

Мощность на валу двигателя при подъеме магнита

$$P'_{c1} = \frac{G_0 v}{102 \eta_{л}} = \frac{1910 \cdot 0,33}{102 \cdot 0,55} = 11,2 \text{ квт.}$$

То же при спуске магнита

$$P'_{c2} = \frac{G_0 v}{102} \eta_{л} = \frac{1910 \cdot 0,33}{102} \cdot 0,55 = 3,4 \text{ квт.}$$

Соответствующие моменты нагрузки:

$$M'_{c1} = 9550 \frac{11,2}{577} = 186 \text{ н.м.}; \quad M'_{c2} = 9550 \frac{3,4}{577} = 56,3 \text{ н.м.}$$

Все данные для расчетов по формулам (11)—(13) известны из паспорта производственного механизма либо из расчетов технологов или механиков. Если отсутствуют данные о к. п. д. передач механизма, его можно подсчитать по формуле

$$\eta_{\text{мех}} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots,$$

где  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  — к. п. д. отдельных элементов передач.

Значения к. п. д. элементов механических передач можно брать из таблицы, приведенной в приложении 3.

Обычно в паспорте механизма указывается к. п. д. при номинальной нагрузке на его рабочем органе  $P_{\text{р.п.}}$ , но не приводятся значения к. п. д. при меньших нагрузках. Коэффициент полезного действия механизма при коэффициенте загрузки по мощности (усилию или моменту на рабочем органе)  $k_3$ , меньшем единицы, можно приближенно определить по формуле

$$\eta = \frac{k_3 \eta_{\text{н}}}{0,6(1 - \eta_{\text{н}}) + 0,6k_3 \eta_{\text{н}} + 0,4k_3}. \quad (14)$$

**Пример 4.** Рассчитать нагрузки на валу двигателя механизма передвижения тележки мостового магнитного крана грузоподъемностью  $G_{\text{н}} = 10 \text{ T}$  (см. пример 3). Полезный поднимаемый груз, соответствующий номинальной грузоподъемности  $G'_{\text{н}} = 8090 \text{ кг}$ .

Вес тележки  $G_{\text{т}} = 3530 \text{ кг}$ ; скорость передвижения  $v = 0,61 \text{ м/сек}$ , соответствующая ей скорость вращения двигателя  $n_{\text{д}} = 910 \text{ об/мин}$ ; номинальный к. п. д. передач  $\eta_{\text{н}} = 0,82$ ; диаметр цапфы оси колеса  $d = 60 \text{ мм}$ ; диаметр колеса  $D = 350 \text{ мм}$  (см. рис. 10).

Мощность на валу двигателей механизмов передвижения тележки и моста крана следует подсчитывать по формуле

$$P_{\text{с}} = \frac{k_{\text{р}} (G_{\text{мех}} + G_0 + G_{\text{гр}}) \left( 0,1 \frac{d}{2} + 0,08 \right) v}{102 \frac{D}{2} \eta} \text{ квт},$$

где  $G_{\text{мех}}$  — собственный вес тележки или моста с оборудованием,  $\text{кг}$ ;

$G_0$  — вес захватывающего приспособления (крюковой подвески, магнита, грейфера и т. п.),  $\text{кг}$ ;

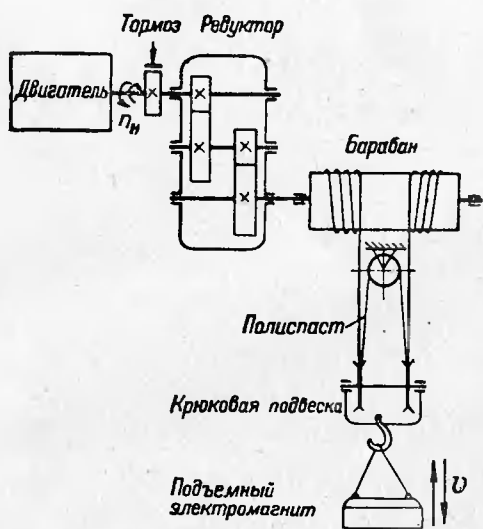
$G_{\text{гр}}$  — вес полезного груза,  $\text{кг}$ ;

$v$  — скорость передвижения,  $\text{м/сек}$ ;

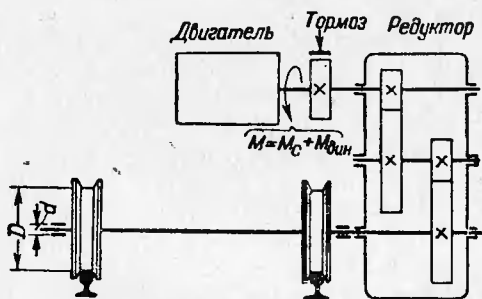
$\eta$  — к. п. д. передач;

$k_{\text{р}}$  — коэффициент, учитывающий трение реборд колес о рельсы; для тележки  $k_{\text{р}} = 1,5$ , для моста  $k_{\text{р}} = 2$ ;

$d, D$  — диаметры соответственно цапфы оси и колеса,  $\text{см}$ .



а)



б)

Рис. 10. Кинематические схемы механизмов мостового магнитного крана.

а — механизм подъема; б — механизм передвижения тележки.

Определим мощность на валу двигателя при передвижении тележки с грузом, соответствующим номинальной грузоподъемности:

$$P_{с1} = \frac{1,5 (3\,530 + 1\,910 + 8\,090) (0,1 \cdot 3 + 0,08) \cdot 0,61}{102 \cdot 17,5 \cdot 0,82} = 3,21 \text{ квт.}$$

Для расчета мощности на валу двигателя при передвижении тележки без груза необходимо знать к. п. д. передач  $\eta$  при уменьшенной загрузке. Коэффициент загрузки для крановых механизмов подсчитывается так:

$$k_3 = \frac{G_{\text{мех}} + G_0 + G_{\text{гр}}}{G_{\text{мех}} + G_{\text{н}}}.$$

При отсутствии груза ( $G_{\text{гр}} = 0$ )

$$k_3 = \frac{3\,530 + 1\,910}{3\,530 + 10\,000} = 0,4.$$

Подсчитаем к. п. д. при такой нагрузке по формуле (14):

$$\eta = \frac{0,4 \cdot 0,82}{0,6 (1 - 0,82) + 0,6 \cdot 0,4 \cdot 0,82 + 0,4 \cdot 0,4} = 0,71.$$

Мощность на валу двигателя при движении без груза

$$P_{с2} = \frac{1,5 (3\,530 + 1\,910) (0,1 \cdot 3 + 0,08) \cdot 0,61}{102 \cdot 17,5 \cdot 0,71} = 1,5 \text{ квт.}$$

До сих пор мы рассматривали нагрузки двигателя при работе с постоянной скоростью вращения, т. е. в установившихся режимах работы. Режимы работы двигателя, при которых скорость вращения изменяется (пуск, торможение и т. п.), называются неустановившимися или переходными. В переходных режимах в механизме возникают дополнительные силы и моменты, и нагрузки на валу двигателя отличаются от рассмотренных выше.

Рассмотрим нагрузки на валу двигателя механизма передвижения тележки мостового крана (рис. 10,б). В установившемся режиме двигатель должен развивать момент необходимый для преодоления всех сил трения, действующих в механизме: трения колес о рельсы, трения в цапфах колес, трения в подшипниках и зубчатых зацеплениях редуктора (см. пример 4).

В переходном режиме пуска инерционные массы привода и механизма движутся с ускорением. При этом

в соответствии с известным законом физики возникают силы инерции, пропорциональные ускорению и противодействующие увеличению скорости. Преодолевая эти дополнительные силы, двигатель совершает работу, в результате которой увеличивается запас кинетической энергии во всех поступательно и вращательно движущихся частях установки. В связи с этим в процессе пуска двигатель должен развивать больший вращающий момент, чем в установившемся режиме.

Силы трения действуют как в установившемся, так и в переходном режимах. Такие силы и моменты принято называть статическими. Силы инерции связаны с изменениями скорости и возникают только в переходных процессах. Такие силы и моменты называют динамическими.

Для расчета нагрузок двигателя, ускорений, времени пуска и торможения привода используется следующее уравнение:

$$M = M_c + M_{\text{дин}} = M_c + \frac{J_{\Sigma}}{9,55} \cdot a_{\text{вр}}, \quad (15)$$

где  $M$  — момент, развиваемый двигателем,  $\text{н} \cdot \text{м}$ ;

$M_c$  — момент на валу двигателя, обусловленный всеми статическими силами в механизме и передачах (статический момент нагрузки),  $\text{н} \cdot \text{м}$ ;

$M_{\text{дин}}$  — динамический момент,  $\text{н} \cdot \text{м}$ ;

$J_{\Sigma}$  — суммарный момент инерции на валу двигателя, характеризующий инерционность всех вращательно и поступательно движущихся частей установки,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$a_{\text{вр}}$  — ускорение вала двигателя,  $\text{об/мин/сек}$ .

Момент инерции имеет при вращательном движении тот же физический смысл, что и масса при поступательном.

В уравнении (15) суммарный момент инерции  $J_{\Sigma}$  является мерой инерции всех движущихся частей. Суммарный момент инерции подсчитывают, зная моменты инерции или массы отдельных элементов установки, движущихся с разными, но взаимосвязанными скоростями: моменты инерции ротора двигателя, отдельных валов редуктора с шестернями, поступательно движущиеся массы установки и т. п.

Запас кинетической энергии в поступательно движущейся массе  $m$  кг определяется известной формулой

$$W_{к.п} = \frac{mv^2}{2} \text{ дж.} \quad (16)$$

То же во вращающейся массе, обладающей моментом инерции  $J$ :

$$W_{к.вр} = \frac{Jn^2}{182} \text{ дж.} \quad (17)$$

Как правило, из всех движущихся частей привода и механизма наибольшим запасом кинетической энергии обладает ротор электродвигателя. Поэтому основную долю в суммарном моменте инерции  $J_{\Sigma}$  составляет момент инерции двигателя  $J_{дв}$ . В практических расчетах для определения суммарного момента инерции можно пользоваться следующей приближенной формулой:

$$J_{\Sigma} = (1,2 \div 1,3) J_{дв} + \frac{182}{n^2} W_{к.мех} \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (18)$$

где  $W_{к.мех}$  — суммарный запас кинетической энергии во вращательно и поступательно движущихся массах рабочего органа механизма.

Величину  $W_{к.мех}$  в формуле (18) нужно учитывать только в том случае, если рабочий орган механизма обладает большими массами (массивные, вращающиеся с большой скоростью барабаны, значительные поступательно движущиеся массы, маховики и т. п.). Коэффициентом (1,2 ÷ 1,3) приближенно учитываются инерционные массы соединительных муфт, тормозных шкивов, валов и шестерен передач привода.

Значения момента инерции ротора (якоря)  $J_{дв}$  кг · м<sup>2</sup> для наиболее распространенных двигателей указаны в приложениях к настоящему изданию брошюры. В предыдущем издании, а также во всех имеющихся в настоящее время каталогах приводятся значения так называемого махового момента ротора или якоря двигателя  $GD_{дв}^2$ , выраженного в единицах системы МКГС и имеющего размерность кгГ · м<sup>2</sup>.

Момент инерции двигателя в системе единиц МКСА, необходимый для расчетов по формулам (15) и (18), можно

вычислить по известной величине махового момента двигателя  $GD_{дв}^2$  кг·м<sup>2</sup> с помощью соотношения

$$J_{дв} = \frac{GD_{дв}^2}{4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Динамические нагрузки, возникающие при пусках и торможениях привода, увеличивают потери в двигателе, но чем они кратковременнее в сравнении с продолжительностью работы в установившемся режиме, тем ничтожнее влияние их на нагрев двигателя. Поэтому во многих случаях по условиям нагрева можно было бы кратковременно допустить момент двигателя, много больший, чем номинальный.

Однако, кроме нагрева, существуют другие факторы, которые ограничивают допустимую перегрузку двигателя. Для каждого двигателя существует предельное значение момента, допустимого по условиям нормальной работы двигателя, превышать которое нельзя даже кратковременно. Отношение этого максимально допустимого момента к номинальному называется перегрузочной способностью двигателя.

Для двигателей постоянного тока допустимая перегрузка ограничивается условиями работы коллектора. При недопустимо большой перегрузке и соответственно недопустимо большом токе якоря на коллекторе возникает сильное искрение и даже так называемый круговой огонь, в результате которого машина выходит из строя. Для двигателей с независимым и смешанным возбуждением перегрузочная способность  $M_{доп}/M_n = 2 \div 2,5$ . Для двигателей с последовательным возбуждением она выше:  $M_{доп}/M_n = 2,5 \div 3,0$ .

Иными причинами ограничивается перегрузочная способность асинхронного двигателя. Из рис. 11 можно видеть, что при увеличении нагрузки на валу такой двигатель соответственно увеличивает свой движущий момент лишь до максимального (критического) значения момента  $M_{макс}$ . Если момент нагрузки превысит максимальный момент  $M_{макс}$ , двигатель останавливается, так как дальнейшее снижение его скорости вызывает не увеличение движущего момента, а уменьшение его.

Перегрузочная способность асинхронного двигателя

определяется по его максимальному моменту с учетом возможного снижения напряжения заводской сети на 10% (момент  $M_{\text{макс}}$  пропорционален квадрату напряжения):

$$\frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{н}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{н}}}\right)^2 \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = 0,81 \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} \quad (19)$$

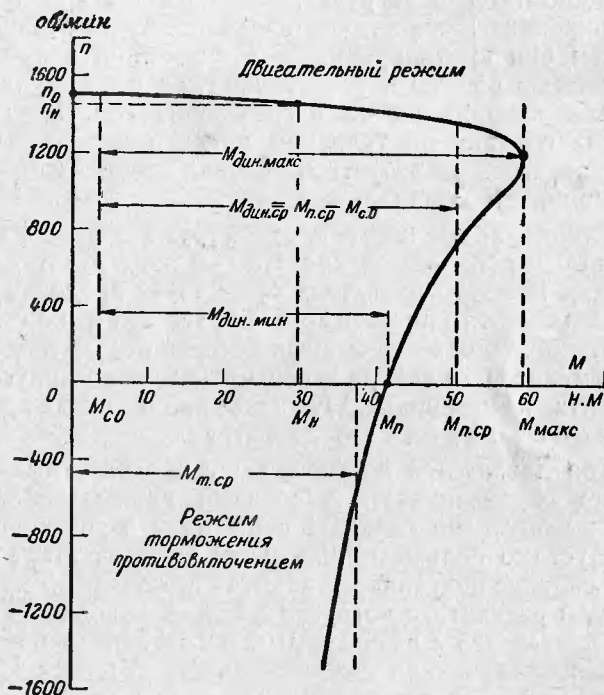


Рис. 11. Механическая характеристика  $M=f(n)$  асинхронного двигателя типа АО 51-4.

Значения  $M_{\text{макс}}/M_{\text{н}}$  для асинхронных двигателей указываются в каталогах. Для двигателей серий А, АО, МТК, МТ (МТВ) величины  $M_{\text{макс}}/M_{\text{н}}$  приведены в приложениях.

Пример 5. Определить перегрузочную способность асинхронного двигателя типа АО 51-4, а также время его пуска и торможения при холостом ходе станка по данным примера 2.

Из приложения 1 находим:

$$J_{дв} = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = 2; \quad \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} = 1,4.$$

Перегрузочная способность двигателя по формуле (19)

$$\frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{н}}} = 0,81 \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = 0,81 \cdot 2 = 1,62.$$

Определим номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{н}} = 9550 \frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 9550 \frac{4,5}{1440} = 29,8 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент двигателя

$$M_{\text{п}} = \left( \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} \right) M_{\text{н}} = 1,4 \cdot 29,8 = 41,7 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент двигателя

$$M_{\text{макс}} = \left( \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} \right) M_{\text{н}} = 2 \cdot 29,8 = 59,6 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Определим средний пусковой момент двигателя с короткозамкнутым ротором через пусковой и максимальный моменты (см. рис. 11) по формуле

$$M_{\text{п.ср}} = \frac{M_{\text{п}} + M_{\text{макс}}}{2} = \frac{41,7 + 59,6}{2} = 50,7 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Если для быстрой остановки шпинделя используется торможение противовключением двигателя (противотоком), то средний тормозной момент для двигателя с короткозамкнутым ротором следует определять так:

$$M_{\text{т.ср}} = 0,9M_{\text{п}} = 0,9 \cdot 41,7 = 37,5 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Определим суммарный момент инерции на валу двигателя пренебрегая запасом кинетической энергии в самом шпинделе и изделии, по формуле (18):

$$J_{\Sigma} = 1,25J_{дв} = 1,25 \cdot 0,05 = 0,0625 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Среднее ускорение при пуске (пуск осуществляется при холостом ходе станка;  $M_{с0} = 3,65 \text{ н} \cdot \text{м}$ ) определяется с помощью формулы (15):

$$a_{вр.п} = 9,55 \frac{M_{\text{п.ср}} - M_{с0}}{J_{\Sigma}} = 9,55 \frac{47,1}{0,0625} = 7200 \frac{\text{об/мин}}{\text{сек}}.$$

Время пуска до установившейся скорости холостого хода  $n_{c0} \approx n_0$

$$t_{п} = \frac{n_{c0}}{a_{вр.п}} = \frac{1500}{7200} = 0,208 \text{ сек.}$$

Время торможения

$$t_{т} = \frac{n_{c0}}{a_{вр.т}} = \frac{J_{\Sigma}}{9,55} \cdot \frac{n_{c0}}{M_{т.ср} + M_{c0}} = \frac{0,0625}{9,55} \cdot \frac{1500}{37,5 + 3,65} = 0,238 \text{ сек.}$$

Таким методом определения времени пуска и торможения можно пользоваться для всех двигателей.

При расчетах двигателей единой серии А и АО можно пользоваться приведенными в приложении 1 значениями времени пуска  $t_{п0}$  и торможения  $t_{т0}$  двигателя, не связанного с производственным механизмом. Пользуясь значением  $t_{п0}$ , можно определить время пуска двигателя, связанного с производственным механизмом, по формуле

$$t_{п} = t_{п0} \frac{J_{\Sigma}}{J_{дв}} \cdot \frac{M_{п.ср}}{M_{п.ср} - M_c} \text{ сек.} \quad (20)$$

Аналогично определяется и время торможения:

$$t_{т} = t_{т0} \frac{J_{\Sigma}}{J_{дв}} \cdot \frac{M_{т.ср}}{M_{т.ср} + M_c} \text{ сек.} \quad (21)$$

В нашем случае для двигателя АО 51-4 в приложении 1 указано  $t_{п0} = 0,15 \text{ сек.}$ ,  $t_{т0} = 0,2 \text{ сек.}$  Следовательно, в соответствии с формулами (20) и (21)

$$t_{п} = 0,15 \frac{0,0625}{0,05} \cdot \frac{50,7}{50,7 - 3,65} = 0,202 \text{ сек.};$$

$$t_{т} = 0,2 \frac{0,0625}{0,05} \cdot \frac{37,5}{37,5 + 3,65} = 0,228 \text{ сек.}$$

Нетрудно видеть, что, пользуясь табличными значениями  $t_{п0}$  и  $t_{т0}$ , мы получили примерно те же времена пуска и торможения, что и выше.

Механическая характеристика двигателя АО 51-4 и величины минимального, среднего и максимального динамических моментов для случая пуска двигателя показаны на рис. 11.

**Пример 6.** Определить по данным примера 3 пусковой момент двигателя, необходимый для получения ускорения груза  $a = 0,4 \text{ м/сек}^2$  при пуске на подъем с номинальным грузом.

Определим суммарный момент инерции на валу двигателя по формулам (16) и (18) для случая подъема номинального груза:

$$J_{\Sigma} = 1,3J_{дв} + \frac{182}{n_{н}^2} W_{к.п} = 1,3 \cdot 4,38 + \frac{182}{577^2} \cdot \frac{10000 \cdot 0,33^2}{2} = 6,0 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Время пуска при  $a = 0,4 \text{ м/сек}^2$

$$t_{\text{п}} = \frac{v}{a} = \frac{0,33}{0,4} = 0,825 \text{ сек.}$$

Ускорение вала двигателя, соответствующее требуемому линейному ускорению  $a$

$$a_{\text{вр}} = \frac{n_{\text{п}}}{t_{\text{п}}} = \frac{577}{0,825} = 698 \frac{\text{об/мин}}{\text{сек}}.$$

Динамический момент определяется из формулы (15):

$$M_{\text{дин}} = \frac{J_{\Sigma}}{9,55} a_{\text{вр}} = \frac{6,0}{9,55} \cdot 698 = 439 \text{ н. м.}$$

Необходимый пусковой момент двигателя (при пуске на подъем с грузом)

$$M_{\text{п1}} = M_{\text{с1}} + M_{\text{дин}} = 743 + 437 = 1\,280 \text{ н. м.}$$

Полученное значение пускового момента можно использовать для расчета пускового реостата способом, изложенным в [Л. 3].

## 6. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ ДЛИТЕЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Изложенные выше сведения дают представление о важнейших признаках, по которым следует подбирать двигатели, а также о практическом значении того или иного признака. Часть из них у выбираемого двигателя должна либо полностью, либо без значительных отклонений соответствовать данным заменяемого двигателя. К их числу относятся в первую очередь род тока, разновидность двигателя, исполнение его по способу монтажа и в отношении защиты от воздействия окружающей среды, номинальное напряжение, частота и скорость вращения двигателя.

Более сложен в условиях эксплуатации подбор двигателя необходимой мощности, соответствующей мощности нагрузки, создаваемой на его валу производственным механизмом. Правильный выбор двигателя по мощности имеет важнейшее практическое значение.

Если нагрузить двигатель мощностью, большей, чем указано на его щитке, он, очевидно, будет перегреваться. Превышение допустимой для двигателя температуры вызывает ускоренное старение его изоляции и быстрое сокращение срока службы двигателя. При значительной

перегрузке этот срок может сократиться до нескольких часов, т. е. двигатель попросту сгорит.

Это положение известно и учитывается в эксплуатации. Однако к вредным последствиям приводит и значительная недогрузка двигателя. Коэффициент полезного действия недогруженного двигателя невелик (см. рис. 7). При этом значительная доля потребляемой из сети мощности бесполезно теряется в самом двигателе. При работе вхолостую двигатель, не совершая полезной работы, потребляет из сети мощность потерь  $\Delta P_{\text{пот}}$  (см. рис. 3). Поэтому необходимо стремиться заменять недогруженные двигатели двигателями меньшей мощности и исключать длительную работу двигателей вхолостую.

Для асинхронных двигателей недогрузка вызывает не только уменьшение к. п. д., но и снижение коэффициента мощности двигателя ( $\cos \varphi$ ). При этом ухудшаются условия работы питающей сети и увеличиваются потери электрической энергии в ней [Л. 4].

Таким образом, правильный выбор двигателей по мощности обеспечивает не только высокую надежность работы электроприводов механизмов, но и наиболее экономичное потребление электрической энергии. Вопросы же экономии электроэнергии имеют для народного хозяйства страны важнейшее значение.

При длительном режиме выбор электродвигателей осуществляется достаточно просто в тех случаях, когда нагрузку механизма можно считать постоянной. Наиболее характерны в этом отношении насосы, вентиляторы, компрессоры, различного рода конвейеры длительного режима работы, ряд текстильных машин и другие аналогичные механизмы.

Для этих машин условием выбора двигателя, рассчитанного на длительный режим, является соотношение

$$P_c \leq P_n, \quad (22)$$

где  $P_c$  — мощность статической нагрузки на валу;

$P_n$  — номинальная мощность двигателя, рассчитанного на длительный режим работы.

При выполнении условия (22) двигатель не будет перегреваться выше допустимой температуры, если температура окружающей среды не превышает  $35^\circ \text{C}$ .

Для выбора двигателя нужно знать величину мощности  $P_c$ . В ряде случаев она может быть определена путем расчета, но в условиях эксплуатации не всегда имеются необходимые для расчета исходные данные.

Если известно, что заменяемый двигатель при работе загружен нормально, то можно считать, что мощность

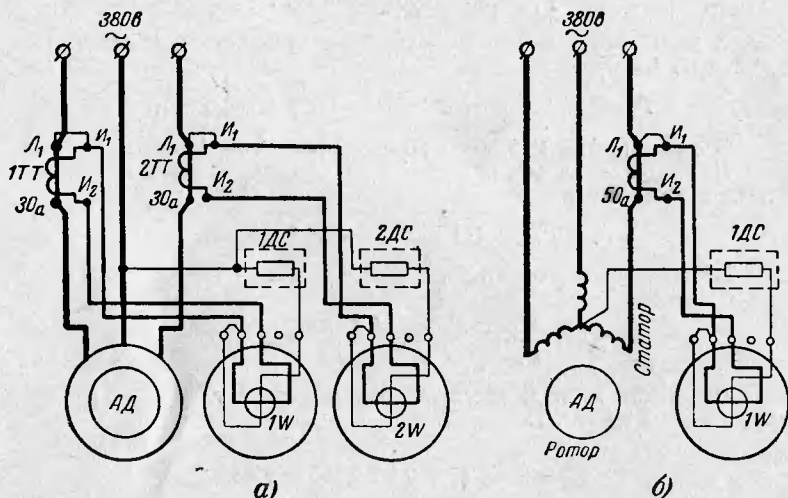


Рис. 12. Схемы измерения мощности, потребляемой асинхронным двигателем из сети.

а — с двумя ваттметрами; б — с одним ваттметром при соединении обмотки статора в звезду.

АД — асинхронный двигатель; 1ТТ, 2ТТ — измерительные трансформаторы тока; 1W, 2W — ваттметры; 1ДС, 2ДС — добавочные сопротивления к цепям напряжения ваттметров.

статической нагрузки  $P_c$  равна номинальной мощности заменяемого двигателя.

Статическая нагрузка на валу двигателя для механизмов с постоянной мощностью на валу может быть определена и опытным путем. Этот путь определения нагрузок наиболее целесообразен в случаях, когда заменяемый двигатель сильно недогружен либо, напротив, перегружается при работе.

**Пример 7.** Асинхронный двигатель типа А 62-6;  $P_n = 10$  квт;  $U_n = 380$  в;  $I_n = 21,5$  а;  $n_n = 970$  об/мин;  $\eta_n = 0,865$  установлен на приводной станции цепного подвешного конвейера. Определить опытным путем его загрузку и рассчитать мощность на валу и статический момент.

Для определения мощности, потребляемой двигателем из сети при нормальных условиях работы конвейера, можно использовать одну из схем измерения, приведенных на рис. 12. Полагая, что читатель практически знаком с измерительной техникой, останавливаться на описании схем измерения не будем.

При замере мощности в схеме на рис. 12,а получены следующие показания ваттметров:

$$P_{1W}=562 \text{ вт}; P_{2W}=3\,938 \text{ вт.}$$

В этом случае мощность, потребляемая двигателем, подсчитывается по формуле

$$P_1=P_{1W}+P_{2W}=562+3\,938=4\,500 \text{ вт}=4,5 \text{ квт.}$$

В схеме на рис. 12,б получено показание  $P_{1W}=1\,500 \text{ вт}$ .

При этом мощность, потребляемую двигателем из сети, подсчитываем по формуле

$$P_1=3P_{1W}=3 \cdot 1\,500=4\,500 \text{ вт}=4,5 \text{ квт.}$$

Приближенно подсчитываем коэффициент загрузки двигателя по мощности:

$$k_a = \frac{P_c}{P_n} \approx \frac{P_1 \eta_n}{P_n} = \frac{4,5 \cdot 0,865}{10} = 0,39.$$

Определим к. п. д. двигателя при  $k_a=0,39$  с помощью кривых, приведенных на рис. 7:

$$\frac{\eta}{\eta_n} = 0,96; \eta_1 = 0,96 \cdot 0,865 = 0,83.$$

Уточненное значение мощности на валу двигателя

$$P_c = P_1 \eta_1 = 4,5 \cdot 0,83 = 3,73 \text{ квт.}$$

Соответствующий статический момент на валу двигателя

$$M_c \approx 9\,550 \frac{P_c}{n_n} = 9\,550 \frac{3,73}{970} = 36,7 \text{ н} \cdot \text{м.}$$

Можно видеть, что если в резерве имеется двигатель типа А 52-6;  $P_n=4,5 \text{ квт}$ ;  $U_n=380 \text{ в}$ ;  $I_n=10,1 \text{ а}$ ;  $n_n=950 \text{ об/мин}$ , то целесообразно заменить им двигатель типа А 62-6.

Однако предварительно нужно проверить двигатель А 52-6 по пусковому моменту, так как конвейеры являются механизмами с тяжелыми условиями пуска. Такая проверка выполнена ниже в примере 13.

У многочисленной группы производственных механизмов — различных металлорежущих станков, кузнечно-штамповочных машин, некоторых машин-автоматов в пищевой промышленности и т. п. — при длительном режиме работы нагрузка не остается постоянной, а периодически меняется.

Например, приводной двигатель сверлильного станка имеет наибольшую нагрузку в период сверления, а наименьшую — при работе вхолостую в период замены изделия. Такой цикл работы с переменной нагрузкой повторяется в течение длительного времени.

Нетрудно видеть, что этот режим работы не соответствует номинальному длительному режиму работы двигателя. В таких случаях применяются специальные методы проверки по нагреву и определения требуемой по нагреву мощности двигателя.

Примерный график работы двигателя с переменной циклической нагрузкой  $P_c$  на валу представлен на рис. 13,а. В общем случае он может иметь более сложную форму, например большее число участков работы с различными нагрузками за время цикла  $t_{ц}$ .

Если при таком графике работы выбрать двигатель длительного режима с номинальной мощностью, равной наибольшей статической нагрузке  $P_1$ , то он будет недогружен. Такой двигатель может длительно работать с постоянной нагрузкой на валу, равной  $P_1$ , а из графика на рис. 13,а видно, что большую часть времени цикла нагрузка двигателя значительно меньше.

Учитывая это, в период максимальной нагрузки двигатель можно несколько перегрузить, т. е. выбрать двигатель с номинальной мощностью, меньшей, чем  $P_1$ . Однако перегрузка должна быть такой, чтобы в среднем имели место номинальные условия нагрева двигателя.

При постоянной нагрузке на валу мощность потерь остается неизменной. При изменяющейся нагрузке двигателя соответственно меняется и мощность потерь  $\Delta P$  в двигателе (см. рис. 13,а). Сравнивая эти два случая, считают, что условия нагрева двигателя одинаковы, если средняя мощность потерь за время цикла при переменной циклической нагрузке равна мощности потерь при постоянной нагрузке. Это справедливо, если продолжительность цикла  $t_{ц}$  много меньше, чем продолжительность нагревания двигателя  $t_{нагр}$ .

Следовательно, для нормальных условий нагревания двигателя при работе с переменной циклической нагрузкой необходимо, чтобы средняя за время цикла мощность потерь в двигателе  $\Delta P_{ср}$  была равна или несколько меньше мощности потерь в номинальном режиме  $\Delta P_{н}$ :

$$\Delta P_{ср} \leq \Delta P_{н}. \quad (23)$$

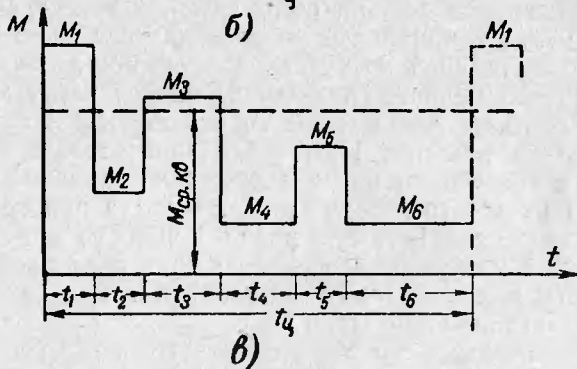
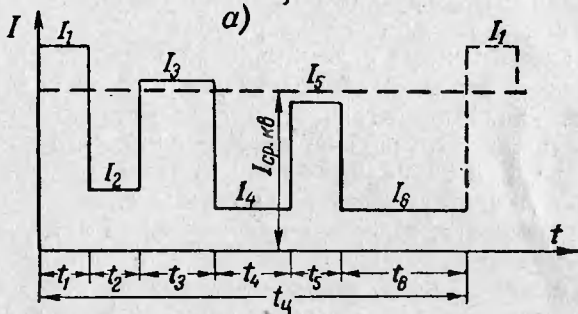
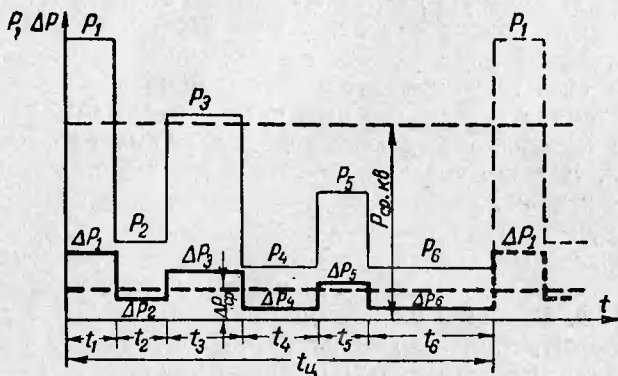


Рис. 13. Графики изменения нагрузки двигателя при работе в длительном режиме с переменной циклической нагрузкой.

Средние потери  $\Delta P_{\text{ср}}$  подсчитываются по формуле

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \text{ кВт}, \quad (24)$$

где  $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$  — мощности потерь на участках рабочего цикла, *квт*;

$t_1, t_2, \dots, t_n$  — длительности соответствующих участков рабочего цикла, пронумерованных индексами 1, 2, 3, ..., *n*, *сек.*

Мощность переменных потерь в двигателе пропорциональна квадрату тока двигателя (см. § 3). Отсюда следует другой способ проверки двигателя по нагреву: если среднеквадратичный за время цикла ток двигателя  $I_{\text{ср.кв}}$  равен номинальному току  $I_{\text{н}}$  или несколько меньше его, то двигатель загружен нормально:

$$I_{\text{ср.кв}} \leq I_{\text{н}}. \quad (25)$$

Величина среднеквадратичного тока подсчитывается по графику  $I=f(t)$  (см. рис. 13,б) с помощью формулы

$$I_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \text{ а}. \quad (26)$$

Формулы (25) и (26) целесообразно использовать для проверки загрузки двигателя по опытной кривой тока якоря, полученной с помощью самопишущего амперметра.

В практике возникает необходимость не только проверки установленного на механизме двигателя по нагреву, но и определения расчетным путем потребной мощности двигателя. Получить удобные для этой цели формулы можно, если принять, что между моментом двигателя и его током существует пропорциональная зависимость. При этом нагрев двигателя определяется среднеквадратичным моментом (см. рис. 13,в):

$$M_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \text{ н. м.} \quad (27)$$

Формула (27) справедлива для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением при работе с номинальным током возбуждения, а также для асинхрон-

ных двигателей при работе на устойчивой части механической характеристики (примерно при изменении момента от 0 до  $0,8 M_{\text{макс}}$ , см. рис. 11). Для двигателей с последовательным возбуждением пользоваться формулой среднеквадратичного момента не рекомендуется.

По величине среднеквадратичного момента можно определить требуемую мощность двигателя, зная необходимую для механизма скорость вращения:

$$P_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{ср.кв}} n_{\text{н}}}{9550}.$$

Зная величину  $P_{\text{тр}}$ , можно подобрать двигатель длительного режима из имеющихся в резерве, для которого

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{тр}}.$$

Если можно приближенно считать, что мощность на валу двигателя пропорциональна его току, то требуемая мощность двигателя определяется непосредственно по формуле (см. рис. 13,а)

$$P_{\text{тр}} = P_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \text{ квт.} \quad (28)$$

Этой формулой не следует пользоваться в тех случаях, когда при работе скорость двигателя изменяется в широких пределах: при пусках, реверсах и торможениях, а также при регулировании скорости двигателей постоянного тока или асинхронных с фазовым ротором путем введения сопротивлений в цепь якоря или ротора. В остальных случаях формула среднеквадратичной мощности дает приближенную оценку условий нагрева двигателя с приемлемой точностью.

**Пример 8.** На токарном станке (см. пример 2) вследствие перехода на скоростное точение мощности резания возросли соответственно до  $P_{z1}=8,5$  квт и  $P_{z2}=5,1$  квт. Управление станком осуществляется таким образом, что для остановки шпинделя не требуется останавливать двигатель.

Цикл обработки детали условно упростим, полагая, что деталь обрабатывается в два приема: черновая и чистовая обточка цилиндрической поверхности. Положим, что по данным хронометража (или расчетам технологов) время черновой обработки  $t_{m1}=17$  сек, чистовой  $t_{m2}=10$  сек, пауз  $t_{01}=6$  сек,  $t_{02}=25$  сек. Необходимо определить, следует ли при таком изменении технологического процесса заменить установленный на станке двигатель.

Определим мощности на валу двигателя аналогично тому, как это выполнено в примере 2:

$$P_{c1} = \frac{P_{z1}}{\eta_1} = \frac{8,5}{0,78} = 10,9 \text{ кВт};$$

$$P_{c2} = \frac{P_{z2}}{\eta_1} = \frac{5,1}{0,78} = 6,55 \text{ кВт}.$$

Мощность на валу при холостом ходе по данным примера 2

$$P_{c0} = 0,55 \text{ кВт}.$$

График цикла работы представлен на рис. 14.

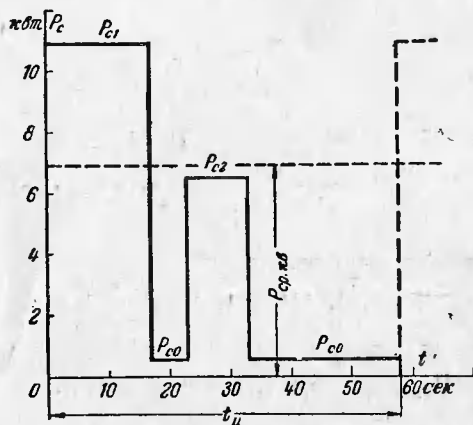


Рис. 14. График изменения статической нагрузки на валу двигателя шпинделя токарного станка.

Определим по формуле (28) среднеквадратичную мощность нагрузки:

$$P_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{10,9^2 \cdot 17 + 0,55^2 \cdot 6 + 6,55^2 \cdot 10 + 0,55^2 \cdot 25}{17 + 6 + 10 + 25}} = 6,9 \text{ кВт}.$$

Таким образом, установленный на станке двигатель необходимо заменить, так как для него

$$P_H = 4,5 \text{ кВт} < P_{\text{ср.кв}} = 6,9 \text{ кВт}.$$

По данным двигателей АО (приложение 1) находим, что необходимо установить двигатель АО 52-4;  $P_H = 7 \text{ кВт}$ ;  $n_H = 1440 \text{ об/мин}$ , так как для него

$$P_H = 7 \text{ кВт} > P_{\text{ср.кв}} = 6,9 \text{ кВт}.$$

Определим номинальный момент двигателя АО 52-4:

$$M_{\text{н}} = 9\,550 \frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 9\,550 \frac{7}{1\,440} = 46,4 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Наибольший статический момент нагрузки

$$M_{\text{с.макс}} = 9\,550 \frac{P_{\text{с1}}}{n_{\text{н}}} = 9\,550 \frac{10,9}{1\,440} = 72,4 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Определим перегрузочную способность двигателя АО 52-4. По данным приложения 1 находим

$$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = 2,0.$$

Перегрузочная способность двигателя

$$\frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{н}}} = 0,81 \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = 0,81 \cdot 2,0 = 1,62.$$

Допустимый момент двигателя

$$M_{\text{доп}} = 1,62 M_{\text{н}} = 1,62 \cdot 46,4 = 75 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Проверим двигатель по перегрузочной способности:

$$M_{\text{с.макс}} = 72,4 \text{ н} \cdot \text{м} < M_{\text{доп}} = 75 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Двигатель проходит по перегрузочной способности. Учитывая, что пуск двигателя осуществляется вхолостую, проверки по пусковому моменту не производим.

В реальных условиях цикл обработки как правило, содержит большее число переходов и график нагрузки имеет большее число участков, чем в данном примере, но каких-либо принципиальных изменений в расчеты это не вносит.

Более сложен выбор двигателей по мощности для электроприводов механизмов, работающих в длительном режиме с быстропеременной нагрузкой, снабженных маховиком для сглаживания ударной нагрузки. К числу таких механизмов относятся дробилки, молоты, прессы, различные штамповочные машины. В качестве примера на рис. 15 представлена упрощенная кинематическая схема кривошипного прессы. Электродвигатель посредством клиноременной передачи приводит во вращение ма-

ховик и далее — через зубчатые передачи — кривошип. За один оборот кривошипа связанный с ним рабочий орган пресса совершает один рабочий ход: опускание, штамповку, подъем в исходное положение. В период штамповки статическая нагрузка резко возрастает; на остальных участках данного хода плунсона она незначительна. Соответственно упрощенный график статической нагрузки на валу двигателя должен иметь вид, представленный ломаной 1 на рис. 16,а.

Однако непосредственно использовать этот график для определения требуемой мощности двигателя нельзя, так как он не характеризует действительной нагрузки двигателя. Частота ходов велика и в зависимости от конструкции и назначения пресса составляет 15—40 ходов в минуту. При этих условиях нельзя не учитывать, что скорость вращения двигателя при изменении момента нагрузки на валу не остается постоянной (рис. 16,б).

С учетом этого через несколько циклов после начала работы скорость двигателя будет изменяться по кривой 2, представленной на рис. 16,а, уменьшаясь в период штамповки  $t_{ш}$  до значения  $n_{мин}$  и увеличиваясь в период холостого хода  $t_x$  до значения  $n_{макс}$ . В соответствии с механической характеристикой момент, развиваемый двигателем, также меняется в пределах  $M_2 < M < M_1$  (кривая 3 на рис. 16,а).

В период штамповки  $t_{ш}$  момент нагрузки  $M_c$  все время превышает движущий момент двигателя  $M$  (вертикальная штриховка). Избыточный тормозной момент нагрузки при этом преодолевается за счет освобождающейся кинетической энергии, запасенной во всех движущихся инерционных массах привода и механизма, основную долю которых составляют массы маховика и ротора двигателя. Действительно, за время штамповки скорость

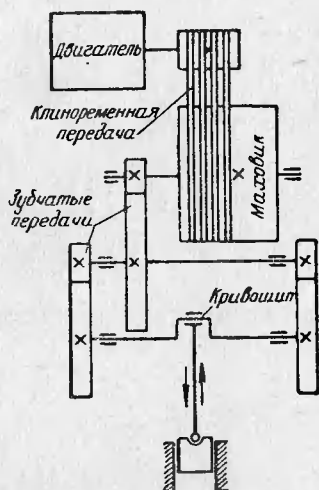


Рис. 15. Кинематическая схема кривошипного пресса.

уменьшается и в соответствии с формулой (17) освобождается следующее количество кинетической энергии:

$$\Delta W_k = W_{k.макс} - W_{k.мин} = \frac{J_{\Sigma} (n_{макс} - n_{мин})^2}{182}.$$

Эта энергия и превращается в механическую работу при деформации штампуемого изделия.

При холостом ходе момент двигателя  $M$  все время больше, чем момент нагрузки  $M_{с0}$  (горизонтальная штриховка на рис. 16,а). Избыточный движущий момент двигателя совершает работу, увеличивая запас кинетической энергии вновь до значения  $W_{k.макс}$ . В движущихся массах привода снова запасается энергия  $\Delta W_k$ , которая будет израсходована в период следующей штамповки.

Таким образом, для маховикового электропривода характерна при резких изменениях момента нагрузки сглаженная зависимость момента, развиваемого двигателем. Использование маховика позволяет уменьшить мощность двигателя, требуемую как по условиям нагрева, так и по перегрузочной способности. Эффект сглаживания кривой  $M=f(t)$  тем сильнее, чем больше суммарный момент инерции привода и чем значительно снижается скорость двигателя при увеличении нагруз-

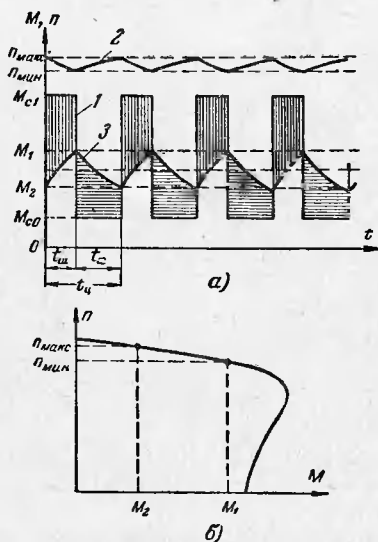


Рис. 16. К описанию режима работы маховикового электропривода.

а — зависимости  $M_{с0}$ ,  $M$ ,  $n=f(t)$ ; б — механическая характеристика приводного асинхронного двигателя.

ки на валу. Это качество механической характеристики, как указано в § 2, для асинхронных двигателей можно характеризовать величиной номинального скольжения  $S_n$ .

Расчет кривой  $M=f(t)$  для маховикового привода сложен, и здесь рассмотреть его не представляется возможным. Учитывая указанные особенности работы махо-

виковых приводов, при замене их двигателей следует стремиться подбирать двигатели, все паспортные данные которых полностью совпадают с соответствующими данными заменяемого двигателя.

**Пример 9.** Двигатель типа АОС 62-4;  $P_n=9$  квт при длительном режиме работы;  $n_n=1\ 340$  об/мин;  $U_n=380/220$  в, установленный на кривошипном прессе, подлежит замене для планово-предупредительного ремонта. Требуется оценить, можно ли заменить его двигателем типа АО 62-4;  $P_n=10$  квт;  $n_n=1\ 460$  об/мин;  $U_n=380/220$  в.

Такая замена в случае острой необходимости может оказаться возможной при выполнении следующих условий:

1. Мощность выбираемого двигателя в длительном режиме работы должна быть не меньше мощности заменяемого двигателя.

2. Моменты инерции этих двигателей  $J_{дв}$  должны различаться незначительно.

3. Скольжение выбираемого двигателя при нагрузке, равной номинальному моменту заменяемого двигателя, должно быть не меньше номинального скольжения заменяемого двигателя.

Первые два условия в данном случае, очевидно, выполняются. Для проверки по третьему условию определим номинальный момент заменяемого двигателя:

$$M_{н.з} = 9\ 550 \frac{P_n}{n_n} = 9\ 550 \frac{9}{1\ 340} = 64,1 \text{ н.м.}$$

Номинальное скольжение этого двигателя

$$s_{н.з} = \frac{n_0 - n_n}{n_0} \cdot 100 = \frac{1\ 500 - 1\ 340}{1\ 500} \cdot 100 = 10,7\%.$$

Номинальный момент выбираемого двигателя

$$M_{н.в} = 9\ 550 \frac{10}{1\ 460} = 65,4 \text{ н.м.}$$

Номинальное скольжение выбираемого двигателя

$$s_{н.в} = \frac{1\ 500 - 1\ 460}{1\ 500} \cdot 100 = 2,67\%.$$

Скольжение выбираемого двигателя при  $M = M_{н.з}$

$$s_v = s_{н.в} \frac{M_{н.з}}{M_{н.в}} = 2,67 \frac{64,1}{65,4} = 2,62\%.$$

Следовательно, использовать двигатель АО 62-4 в данном случае нельзя, так как  $s_v < s_{н.з}$ . Заметим, что в данном случае можно было прийти к этому же выводу, не прибегая к расчетам, на основании обозначения типов этих двух двигателей. Двигатели типа АОС имеют повышенное скольжение и заменять их двигателями типа АО, имеющими нормальное скольжение, не следует. Подобный расчет может оказаться необходимым при попытках использования двигателей ранее выпускавшихся серий АД, МА-200 и т. п.

## 7. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОГО И КРАТКОВРЕМЕННОГО РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Характерной особенностью повторно-кратковременного режима работы является необходимость частых пусков и остановок электродвигателя. Как минимум двигатель включается и отключается 1 раз за время цикла, но в большинстве практических случаев каждый цикл работы механизма требует нескольких пусков и остановок.

Выше мы установили, что в переходных режимах пуска, реверса и торможения возникают динамические нагрузки двигателя. Величина этих дополнительных нагрузок при заданном ускорении в переходных процессах тем меньше, чем меньше суммарный момент инерции на валу двигателя  $J_2$ . Так как обычно основную долю в суммарном моменте инерции составляет момент инерции ротора самого двигателя, для повторно-кратковременного режима желательно применять двигатели, которые при требуемых мощности и скорости вращения имеют возможно меньший момент инерции  $J_{дв}$ .

По условиям нагрева допустимая нагрузка двигателя при повторно-кратковременном режиме выше, чем при длительном. При пуске с такой повышенной статической нагрузкой двигатель должен развивать и повышенный пусковой момент, превосходящий статический на величину требуемого динамического момента (см. пример 6). Поэтому в повторно-кратковременном режиме требуется более высокая перегрузочная способность двигателя, чем в длительном.

Вместе с тем условия нагревания и охлаждения двигателей при повторно-кратковременном режиме отличаются от аналогичных условий при длительном режиме.

Особенно сильно это отличие проявляется у двигателей с самовентиляцией, т. е. у двигателей с вентилятором, расположенным непосредственно на валу ротора. Количество охлаждающего воздуха, подаваемого таким вентилятором в машину, зависит от скорости вращения двигателя.

При работе в длительном режиме скорость двигателя мало отличается от номинальной и в течение всего времени работы имеют место нормальные условия отвода

выделяющегося в двигателе тепла в окружающую среду. В повторно-кратковременном режиме такие условия имеются только на небольших отрезках времени цикла. Остальное время цикла скорость либо меньше, чем номинальная (в переходных процессах пуска и торможения), либо равна нулю (во время пауз). При этом теплоотдача двигателя ухудшается, что и должно учитываться при определении номинальной нагрузки двигателя в этом режиме.

Все указанные особенности приводят к тому, что двигатели, специально предназначенные для повторно-кратковременного режима работы (например, краново-металлургические), отличаются в конструктивном отношении от двигателей длительного режима работы. С целью уменьшения момента инерции их якоря или роторы имеют удлиненную форму. Проектируются эти двигатели таким образом, что они имеют повышенную перегрузочную способность, а номинальная нагрузка определяется с учетом реальных условий охлаждения двигателя при работе в паспортном режиме.

Наиболее часто в условиях эксплуатации приходится заменять двигатели, о которых известно, что при работе механизма они загружены нормально. При этом следует стремиться подобрать точно такой же двигатель, как заменяемый.

Если в резерве нет такого двигателя, а имеются двигатели другого типа, рассчитанные на повторно-кратковременный режим с продолжительностью включения, отличной от указанной на щитке заменяемого двигателя, возникает необходимость определения допустимой нагрузки двигателя при продолжительности включения, отличающейся от паспортной.

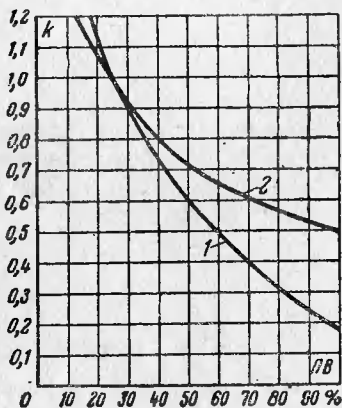


Рис. 17. Зависимости  $k = f(ПВ)$  для определения допустимой нагрузки двигателей при различных продолжительностях включения.

1 — для двигателей серий КТ и КТК; 2 — для двигателей серий МТ, МТК, МТВ, МП, ДП и др.

Для этой цели можно использовать кривые  $k=f(\text{ПВ})$ , приведенные на рис. 17. Коэффициент  $k$  представляет собой отношение номинальной мощности двигателя при данной продолжительности включения ПВ к номинальной мощности при  $\text{ПВ}=25\%$ :

$$k = \frac{P_{\text{ПВ}}}{P_{\text{ПВ}=25\%}}.$$

Если номинальная мощность двигателя соответствует номинальной продолжительности включения  $\text{ПВ}_н$ , не равной 25%, пересчет к любой продолжительности включения ПВ может быть произведен по формуле

$$P_{\text{ПВ}} = \frac{k_{\text{ПВ}}}{k_{\text{ПВ}_н}} P_{\text{ПВ}_н} \text{ квт}, \quad (29)$$

где  $k_{\text{ПВ}}$ ,  $k_{\text{ПВ}_н}$  — коэффициенты допустимой мощности двигателя соответственно при ПВ и  $\text{ПВ}_н$ .

С известным приближением аналогичные формулы можно записать и для пересчета тока и момента двигателя:

$$I_{\text{ПВ}} = \frac{k_{\text{ПВ}}}{k_{\text{ПВ}_н}} I_{\text{ПВ}_н} \text{ а}; \quad M_{\text{ПВ}} = \frac{k_{\text{ПВ}}}{k_{\text{ПВ}_н}} M_{\text{ПВ}_н} \text{ н}\cdot\text{м}. \quad (30)$$

Формулы (29) и (30) могут быть использованы при отсутствии каталожных данных и для определения допустимой нагрузки двигателя в длительном режиме работы, т. е. при  $\text{ПВ}=100\%$ . При этом следует иметь в виду, что графики, представленные на рис. 17, являются усредненными зависимостями для всей серии машин и для некоторых габаритов машин лишь приближенно оценивают допустимую нагрузку двигателя. По усредненной кривой  $I$  на рис. 17 можно видеть, что допустимая нагрузка двигателей серии КТ и КТК в длительном режиме весьма мала. Фактически ряд двигателей этих ранее выпускавшихся серий был сконструирован таким образом, что для них недопустим длительный режим работы даже вхолостую. Поэтому двигатели серий КТ и КТК использовать при  $\text{ПВ}>60\%$  не следует.

**Пример 10.** Необходимо заменить двигатель вентилятора, работающего в длительном режиме, причем в резерве нет подходящего двигателя для длительного режима работы. Данные уста-

новленного двигателя: тип АО 51-6;  $P_n = 2,8$  квт;  $U_n = 220/380$  в;  $n_n = 950$  об/мин; коэффициент загрузки двигателя по данным опыта  $k_s = 0,8$ .

Имеется крановый двигатель типа МТК 21-6;  $P_n = 5$  квт при ПВ=25%;  $U_n = 220/380$  в;  $n_n = 910$  об/мин. Требуется проверить, удовлетворяет ли этот двигатель условиям работы вентилятора.

Определим номинальный момент установленного двигателя:

$$M_{н.уст} = 9550 \frac{P_n}{n_n} = 9550 \frac{2,8}{950} = 28,2 \text{ н}\cdot\text{м}.$$

Статический момент нагрузки

$$M_c = k_s M_{н.уст} = 0,8 \cdot 28,2 = 22,6 \text{ н}\cdot\text{м}.$$

Номинальный момент двигателя МТК 21-6 при ПВ = 25%

$$M_{н(ПВ=25\%)} = 9550 \frac{5}{910} = 52,5 \text{ н}\cdot\text{м}.$$

Для определения допустимого момента этого двигателя в длительном режиме находим по кривой 2 на рис. 17 значения  $k_{ПВ=25\%} = 1,0$  и  $k_{ПВ=100\%} = 0,5$ . Далее, по формуле (30) определяем величину допустимого момента:

$$M_{н(ПВ=100\%)} = \frac{k_{ПВ=100\%}}{k_{ПВ=25\%}} M_{н(ПВ=25\%)} = \frac{0,5}{1,0} \cdot 52,5 = 26,3 \text{ н}\cdot\text{м}.$$

Следовательно, двигатель МТК 21-6 можно использовать взамен установленного, так как для него

$$M_{н(ПВ=100\%)} = 26,3 \text{ н}\cdot\text{м} > M_c = 22,6 \text{ н}\cdot\text{м}.$$

В ряде случаев, например при намечаемых изменениях режима работы механизма в связи с изменением технологического цикла, возникает необходимость определения потребной мощности двигателя путем расчета.

При этом в первую очередь необходимо выяснить, могут ли оказать заметное влияние на нагрев двигателя его динамические нагрузки. Ориентировочно судить об этом можно по соотношению между временем пуска и временем установившейся работы двигателя.

Если  $\frac{t_{уст}}{t_n} < 10$ , динамические нагрузки будут заметно увеличивать нагревание двигателя, и при расчете потребной мощности двигателя их нужно учитывать.

Однако более часто  $\frac{t_{уст}}{t_n} > 10$ . В этих случаях можно

считать, что нагрев двигателя определяется только статической нагрузкой его.

Простейшие способы определения времени пуска показаны в примерах 5 и 6. Время установившейся работы можно определить на работающем механизме с помощью секундомера, а иногда и путем расчета, как это выполнено в примере 12.

Метод расчета потребной мощности двигателя при  $\frac{t_{уст}}{t_n} \gg 10$  в случае, когда известен цикл работы механизма, поясняется следующим примером.

**Пример 11.** По паспорту мостового магнитного крана грузоподъемностью 10 Т его механизм подъема рассчитан на средний режим работы с продолжительностью включения ПВ<sub>н</sub>=25%. Статические нагрузки механизма подъема этого крана рассчитаны в примере 3. Кран предполагается использовать в тяжелом режиме с большей продолжительностью включения механизма подъема. Необходимо подсчитать для этого режима потребную мощность двигателя подъема.

Цикл работы механизма: подъем магнита с номинальным грузом на высоту  $H_1=12$  м; пауза; спуск груза; пауза; подъем магнита без груза на высоту  $H_2=7$  м; пауза; спуск магнита для захвата очередного слитка; пауза. Число циклов в час  $N_{ц}=15$ .

Определим продолжительность подъема груза на высоту  $H_1$ , пренебрегая изменением скорости в переходных процессах:

$$t_{p1} = \frac{H_1}{v} = \frac{12}{0,33} = 36,4 \text{ сек.}$$

Время спуска груза  $t_{p2} \approx t_{p1} = 36,4$  сек.

Аналогично продолжительность подъема и спуска магнита без груза

$$t'_{p1} = t'_{p2} = \frac{H_2}{v} = \frac{7}{0,33} = 21,2 \text{ сек.}$$

Время пуска привода на подъем груза по данным примера 6 составляет  $t_n = 0,825$  сек. Так как  $t_n \ll t_{p1}$ , динамические нагрузки можно не учитывать.

Суммарное время работы в цикле

$$\Sigma t_p = 2t_{p1} + 2t'_{p1} = 2 \cdot 36,4 + 2 \cdot 21,2 = 115,2 \text{ сек.}$$

Время цикла

$$t_{ц} = \frac{3600}{N_{ц}} = \frac{3600}{15} = 240 \text{ сек.}$$

Действительная продолжительность включения двигателя

$$ПВ = \frac{\Sigma t_p}{t_{ц}} \cdot 100 = \frac{115,2}{240} \cdot 100 = 48\%.$$

Суммарное время пауз

$$\Sigma t_0 = t_{ц} - \Sigma t_p = 240 - 115,2 = 124,8 \text{ сек.}$$

Принимая условно продолжительности всех пауз одинаковыми, определим продолжительность одной паузы:

$$t_0 = \frac{\Sigma t_0}{4} = \frac{124,8}{4} = 31,2 \text{ сек.}$$

По этим данным и по данным примера 3 построен график нагрузки двигателя в зависимости от времени, приведенный на рис. 18,а. Нетрудно видеть, что реальный цикл работы двигателя, приведенный на этом рисунке, отличается от номинального цикла при ПВ=25%, приведенного на рис. 6. Сравнить же нагрузки двигателя можно лишь при одинаковых условиях его работы. Поэтому расчет потребной мощности при повторно-кратковременном ре-

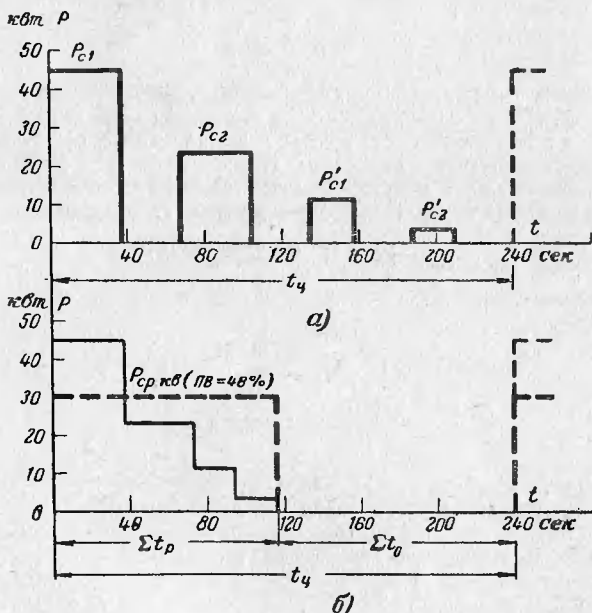


Рис. 18. Цикл работы механизма подъема мостового магнитного крана.

а — действительный; б — расчетный.

жиме работы сводится к приведению графика действительного режима работы (рис. 18,а) к графику номинального режима (см. рис. 6).

График номинального режима соответствует одному включению двигателя, а действительный график в нашем примере содержит четыре включения. Так как мы не учитываем динамических нагрузок, можно считать, что двигатель включается 1 раз, работает время  $\Sigma t_p$  с переменной нагрузкой, а затем отключается на время  $\Sigma t_0 = 4t_0$  (рис. 18,б). Продолжительность включения двигателя при такой перестройке графика осталась той же (ПВ=48%).

Затем необходимо определить среднеквадратичную мощность нагрузки за суммарное время работы двигателя. В предыдущем параграфе мы отметили, что среднеквадратичная нагрузка равноценна в отношении нагрева двигателя действительной переменной нагрузке за одно и то же время  $\Sigma t_p$ :

$$P_{\text{ср.кв ПВ}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{p1} + P_2^2 t_{p2} + (P'_1)^2 t'_{p1} + (P'_2)^2 t'_{p2}}{\Sigma t_p}} \quad \text{квт.} \quad (31)$$

В данном примере

$$P_{\text{ср.кв (ПВ=48\%)}} = \sqrt{\frac{44,8^2 \cdot 36,4 + 23,3^2 \cdot 36,4 + 11,2^2 \cdot 21,2 + 3,4^2 \cdot 21,2}{115,2}} = 30,3 \text{ квт}$$

Заменив на рис. 18,б ступенчатый график нагрузки постоянной за время работы нагрузкой  $P_{\text{ср.кв (ПВ=48\%)}}$ , получим расчетный график, отличающийся от графика номинального режима только продолжительностью включения. Пересчитаем по формуле (29) среднеквадратичную мощность к номинальной продолжительности включения ПВ=25%. По кривой 2 на рис. 17 находим:

$$k_{\text{ПВ=25\%}} = 1; \quad k_{\text{ПВ=48\%}} = 0,72.$$

Следовательно,

$$P_{\text{ср.кв (ПВ=25\%)}} = \frac{k_{\text{ПВ=25\%}}}{k_{\text{ПВ=48\%}}} P_{\text{ср.кв (ПВ=48\%)}} = \frac{1,0}{0,72} \cdot 30,3 = 42 \text{ квт.}$$

Величина  $P_{\text{ср.кв (ПВ=25\%)}}$  является потребной мощностью двигателя при ПВ=25%. Следовательно, действительная нагрузка при заданном цикле работы является допустимой для установленного на лебедке двигателя (см. пример 3), так как

$$P_{\text{ср.кв (ПВ=25\%)}} = 42 \text{ квт} < P_{\text{н (ПВ=25\%)}} = 45 \text{ квт.}$$

Отметим, что при практических расчетах график, приведенный на рис. 18,б, строить нет нужды. Здесь он нам потребовался только для пояснения смысла расчетов по формулам (29)—(31).

Проверим двигатель по перегрузочной способности. По каталожным данным двигателя МТ 62-10 (см. приложение 2) находим  $M_{\text{макс}}/M_{\text{н}} = 3,2$ . Перегрузочная способность двигателя

$$\frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{н}}} = 0,81 \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = 0,81 \cdot 3,2 = 2,59.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{н}} = 9\,550 \frac{45}{577} = 745 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Максимально допустимый момент двигателя

$$M_{\text{доп}} = 2,59 \cdot 745 = 1\,930 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент двигатель должен развивать при пуске на подъем с грузом (см. пример 6)

$$M_{\text{макс.р}} = M_{\text{шт}} = 1\,280 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Двигатель имеет вполне достаточную перегрузочную способность, так как  $M_{\text{макс.р}} < M_{\text{доп}}$ .

Наряду с двигателями краново-металлургических серий для привода механизмов повторно-кратковременного режима широко используются двигатели нормального исполнения, рассчитанные на номинальный длительный режим работы.

Наиболее характерны в этом отношении металлорежущие станки. Так, например, на токарных, фрезерных, некоторых агрегатных и других станках для привода механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме, как правило, используются асинхронные двигатели единой серии, с короткозамкнутым ротором (А, АЛ, АО, АОЛ) либо с контактными кольцами (АК). На продольно-строгальных станках для главного привода при повторно-кратковременном режиме применяются двигатели постоянного тока серии ПН, рассчитанные на длительный режим работы.

При выборе двигателя с номинальным длительным режимом для механизма повторно-кратковременного режима работы следует различать следующие случаи:

1. Выбирается асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Особенности выбора таких двигателей рассмотрены ниже.

2. Выбирается двигатель с независимой вентиляцией.

При выборе двигателя с независимой вентиляцией



мального момента к номинальному  $M_{\max}/M_n=2,0$ . Необходимо проверить, можно ли заменить этим двигателем вышедший из строя двигатель. Кинематическая схема лебедки приведена на рис. 19,а. Технические данные подъемника: скорость подъема  $v=0,75$  м/сек; номинальная грузоподъемность  $G_n=1,5$  Т; вес кабины  $G_k=3,2$  Т; вес противовеса  $G_{пр}=3,95$  Т; к. п. д. лебедки  $\eta_{л}=0,7$ ; требуемое ускорение при пуске и торможении  $a=0,5$  м/сек<sup>2</sup>.

Цикл работы подъемника: подъем тележки весом  $G_t=0,4$  Т с грузом  $G_{гр}=1,1$  Т; пауза, во время которой груженная тележка заменяется пустой; спуск пустой тележки; пауза, во время которой пустая тележка заменяется груженой. Далее цикл многократно повторяется. Высота подъема  $H=9$  м. Число циклов в час  $N_{ц}=65$ .

Обратим внимание на то, что заменяемый двигатель имеет закрытое исполнение, а имеющийся в резерве — защищенное. Будем полагать такую замену возможной, так как подъемная лебедка установлена в сухом непыльном помещении над шахтой подъемника.

Построим график момента двигателя в зависимости от времени с учетом динамических нагрузок.

Время пуска (на подъем или спуск)

$$t_{п} = \frac{v}{a} = \frac{0,75}{0,5} = 1,5 \text{ сек.}$$

Время торможения

$$t_{т} = t_{п} = 1,5 \text{ сек.}$$

Путь, проходимый кабиной с установившейся скоростью,

$$H_{уст} = H - 2 \frac{vt_{п}}{2} = 9 - 2 \frac{0,75 \cdot 1,5}{2} = 7,88 \text{ м.}$$

Время движения с установившейся скоростью

$$t_{уст} = \frac{H_{уст}}{v} = \frac{7,88}{0,75} = 10,5 \text{ сек.}$$

Время цикла

$$t_{ц} = \frac{3600}{N_{ц}} = \frac{3600}{65} = 55,5 \text{ сек.}$$

Суммарное время пауз (см. рис. 19,б)

$$t_{01} + t_{02} = t_{ц} - 2t_{п} - 2t_{т} - 2t_{уст} = 55,5 - 2 \cdot 1,5 - 2 \cdot 1,5 - 2 \cdot 10,5 = 28,5 \text{ сек.}$$

Торможение лебедки осуществляется механическим тормозом. Двигатель при этом отключается от сети.

Статическую нагрузку при подъеме определим, учитывая, что вес противовеса уравновешивает вес кабины и часть поднимаемого груза. Полезная мощность расходуется на подъем неуравновешенного груза:

$$P_{с1} = \frac{(G_k + G_t + G_{гр} - G_{пр}) v}{102 \eta_{л}} = \\ = \frac{(3200 + 400 + 1100 - 3950) \cdot 0,75}{102 \cdot 0,7} = 7,9 \text{ квт.}$$

Статический момент при подъеме

$$M_{c1} = 9\,550 \frac{P_{c1}}{n_H} = 9\,550 \frac{7,9}{953} = 79,3 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Мощность на валу двигателя при спуске

$$P_{c2} = \frac{(G_{np} - G_k - G_T) v}{102 \eta_{л}} = \frac{(3\,950 - 3\,200 - 400) \cdot 0,75}{102 \cdot 0,7} = 3,7 \text{ квт}.$$

При этом двигатель совершает работу по подъему неуравновешенной части противовеса (кабина с пустой тележкой легче, чем противовес).

Статический момент при спуске

$$M_{c2} = 9\,550 \frac{P_{c2}}{n_H} = 9\,550 \frac{3,7}{953} = 37,1 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Определим динамический момент. С этой целью найдем по формулам (16) и (18) суммарный момент инерции на валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = 1,3 J_{дв} + \frac{182}{n_H^2} \cdot \frac{m_H v^2}{2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Здесь коэффициент 1,3 учитывает запас кинетической энергии во всех вращающихся частях лебедки;  $m_H$  — сумма всех поступательно движущихся масс:

$$m_H = m_{np} + m_k + m_T + m_{rp} = 3\,950 + 3\,200 + 400 + 1\,100 = 8\,650 \text{ кг}.$$

$$J_{\Sigma} = 1,3 \cdot 0,238 + \frac{182}{953^2} \cdot \frac{8\,650 \cdot 0,75^2}{2} = 0,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Нетрудно видеть, что в данном примере поступательно движущиеся массы обладают значительной инерцией. Найденное значение  $J_{\Sigma}$  соответствует подъему груза, а при спуске оно будет несколько меньше.

Определим динамический момент при спуске на подъем:

$$M_{дин} = \frac{J_{\Sigma}}{9,55} a_{вp} = \frac{J_{\Sigma}}{9,55} \cdot \frac{n_H}{t_H} = \frac{0,8}{9,55} \cdot \frac{953}{1,5} = 53 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Требуемый пусковой момент двигателя

$$M_{п1} = M_{c1} + M_{дин} = 79,3 + 53 = 132,3 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Будем считать, что при пуске в направлении «спуск» двигатель развивает такой же пусковой момент. Отметим, что при этом фактическое время пуска на спуск будет меньше определенного выше, так как  $M_{c1} > M_{c2}$ .

По полученным расчетным данным на рис. 19,б построен график момента, развиваемого двигателем на различных участках рабочего цикла. По этому графику с помощью формулы (27) подсчитаем

среднеквадратичный момент двигателя за время цикла работы. Однако при этом нужно учесть ухудшение теплоотдачи двигателя с самовентиляцией во время пусков, торможений и пауз и несколько увеличить значение среднеквадратичного момента, которое дает формула (27). По данным опытов известно, что охлаждение двигателя ухудшается при его полной остановке примерно в 2 раза по сравнению с работой при установившейся скорости, а во время пусков и торможений имеет место средняя интенсивность охлаждения двигателя.

Учитывая это, формулу (27) для графика, приведенного на рис. 19,б, можно записать так:

$$M_{ср.кв} = \sqrt{\frac{M_{п1}^2 t_{п1} + M_{с1}^2 t_{уст} + M_{п2}^2 t_{п2} + M_{с2}^2 t_{уст}}{0,5(t_{01} + t_{02}) + 0,75(2t_{п} + 2t_{т}) + 2t_{уст}}}$$

Иными словами, ухудшение теплоотдачи учитывается соответствующим уменьшением суммарного времени пауз (умножением на 0,5) и суммарного времени пусков и торможений (умножением на 0,75) в знаменателе подкоренного выражения, определяющего среднеквадратичную величину. Тем самым среднеквадратичная нагрузка двигателя несколько увеличивается:

$$M_{ср.кв} = \sqrt{\frac{132^2 \cdot 1,5 + 79,3^2 \cdot 10,5 + 132^2 \cdot 1,5 + 37,1^2 \cdot 10,5}{0,5 \cdot 28,5 + 0,75 \cdot 4 \cdot 1,5 + 2 \cdot 10,5}} = 58 \text{ н.м.}$$

Номинальный момент выбираемого двигателя

$$M_{н} = 9550 \frac{P_{н}}{n_{н}} = 9550 \frac{7}{940} = 71,1 \text{ н.м.}$$

Двигатель АК 61-6 по нагреву имеет вполне достаточный момент

$$M_{ср.кв} = 58 \text{ н.м} < M_{н} = 71,1 \text{ н.м.}$$

Необходимо проверить двигатель по перегрузочной способности. Максимально допустимый момент двигателя

$$M_{доп} = 0,81 \frac{M_{макс}}{M_{н}} M_{н} = 0,81 \cdot 2 \cdot 71,1 = 115 \text{ н.м.}$$

Двигатель не обладает достаточной перегрузочной способностью, так как

$$M_{доп} = 115 \text{ н.м} < M_{макс.р} = M_{п1} = 132,3 \text{ н.м.}$$

Поэтому использовать этот двигатель в данном случае нельзя, хотя по условиям нагрева он и обладает достаточной мощностью.

Повторять весь расчет для другого имеющегося в резерве двигателя не требуется. Без большой погрешности можно считать, что требуемая мощность двигателя при длительном режиме известна:

$$P_{тр} = \frac{M_{ср.кв} n_{н}}{9550} = \frac{58 \cdot 953}{9550} = 6,1 \text{ квт.}$$

Следовательно, необходимо подобрать такой двигатель для длительного режима, для которого выполнялись бы условия

$$P_n \geq P_{\text{тр}} = 6,1 \text{ квт};$$

$$M_{\text{доп}} = 0,81 \frac{M_{\text{макс}}}{M_n} M_n \geq M_{\text{шт}} = 132,3 \text{ н.м.}$$

Для подъемно-транспортных механизмов в повторно-кратковременном режиме работы наиболее целесообразно применять двигатели, специально рассчитанные на повторно-кратковременный режим. Для различных механизмов станков с повторно-кратковременным режимом работы применение двигателей для длительного режима вызывает меньшие затруднения. Это объясняется тем, что пуск таких механизмов, как правило, осуществляется без нагрузки.

В заключение кратко остановимся на вопросах выбора двигателей для механизмов с кратковременным режимом работы.

Двигатели на кратковременный режим работы крупными сериями, рассчитанными на универсальное применение, не выпускаются. Поэтому замена двигателя, номинальные данные которого соответствуют кратковременному режиму, просто осуществляется только в том случае, если в резерве есть точно такой же двигатель.

Если же такого двигателя нет и приходится применять двигатель с другим номинальным режимом, расчетным путем определить допустимую мощность весьма сложно. Поэтому здесь мы ограничимся лишь следующей рекомендацией. Если продолжительность работы двигателя в условиях работы механизма не превышает 1,5—2,5 мин, следует выбирать двигатель для повторно-кратковременного режима.

С этой целью нужно рассмотренными выше способами подсчитать наибольшие статическую и динамическую нагрузки и определить максимальный требуемый момент двигателя  $M_{\text{макс.р}}$ . Затем необходимо подобрать двигатель повторно-кратковременного режима для которого наиболее близко выполняется условие

$$M_{\text{доп}} \geq M_{\text{макс.р.}}$$

Таким образом, в подобных случаях двигатель выбирается только по перегрузочной способности, а проверки по нагреву не требуется.

Если продолжительность работы превышает 15 мин, а выбирается небольшой по габаритам двигатель, то для большей надежности следует выбирать двигатель для длительного режима, номинальная мощность которого близка по величине к номинальной мощности заменяемого двигателя кратковременного режима.

## 8. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет важные отличия как от асинхронного двигателя с контактными кольцами, так и от двигателей постоянного тока. Эти отличия обусловлены конструктивной особенностью его ротора, исключающей возможность введения добавочных сопротивлений в цепь роторной обмотки.

При пуске асинхронного двигателя с контактными кольцами в цепь его ротора вводят добавочные сопротивления<sup>1</sup>. Подбором соответствующей величины сопротивления пускового реостата можно уменьшить пусковой ток двигателя до любой требуемой величины. В то же время введение сопротивлений в цепь ротора позволяет регулировать пусковой момент двигателя. При определенной величине сопротивления пускового реостата можно получить наибольший пусковой момент, соответствующий перегрузочной способности двигателя. Постепенно выводя сопротивление по мере разгона, получают быстрый пуск двигателя при ограниченной величине тока.

Иначе протекает пуск двигателя с короткозамкнутым ротором, который осуществляется по схеме, приведенной на рис. 20,а. Если ротор выполнен с круглыми пазами, то начальный пусковой момент двигателя  $M_{\text{п}}$  невелик (характеристика 1 на рис. 20,б). В частности, подобной механической характеристикой обладают двигатели единой серии в ее основном исполнении (А, АО). Ввести добавочное сопротивление в цепь ротора и тем самым уменьшить пусковой ток и увеличить пусковой момент двигателя здесь невозможно.

<sup>1</sup> Вопросы пуска двигателей и расчета пусковых сопротивлений подробно изложены в одном из предыдущих выпусков «Библиотеки электромонтера» [Л. 3].

Большой пусковой ток двигателя, превышающий в 4,5—7 раз номинальный, загружает сеть, вызывая при большой мощности двигателя снижение напряжения в питающей сети. Это неблагоприятно отражается на условиях работы других токоприемников.

Ограниченный пусковой момент, составляющий 0,8—1,3 номинального, затрудняет пуск двигателя под нагрузкой. Если пусковой момент меньше момента нагруз-

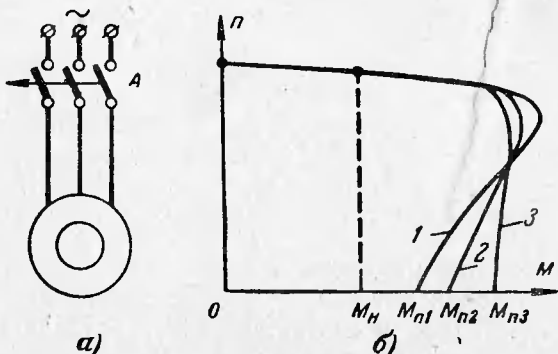


Рис. 20. Схема пуска и пусковые характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

ки на валу, то, очевидно, двигатель будет заторможен нагрузкой и вообще не разгонится. Поэтому пусковой ток и пусковой момент асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором являются его важнейшими эксплуатационными показателями. В каталогах для этих двигателей указываются кратность пускового тока  $I_{п}/I_H$  и кратность пускового момента  $M_{п}/M_H$ .

Улучшенными пусковыми свойствами обладают двигатели со специальным исполнением ротора: с глубоким пазом или двойной беличьей клеткой. При пуске такие двигатели развивают повышенный пусковой момент в сравнении с двигателями нормального исполнения (см. характеристики 2 и 3 на рис. 20,б). Кроме того, специальное исполнение короткозамкнутого ротора несколько ограничивает и пусковой ток двигателя.

В частности, повышенным пусковым моментом обладают асинхронные двигатели единой серии, имеющие

обозначение АП или АОП, а также двигатели с повышенным скольжением (АС и АОС).

Большинство же двигателей с короткозамкнутым ротором имеет пусковой момент, значительно меньший критического. Поэтому при выборе двигателя нужно проверять его не только по нагреву и перегрузочной способности, но и по пусковому моменту.

**Пример 13.** По данным примера 7 проверить по пусковому моменту двигатель типа А 52-6.

При проверке двигателей различных конвейеров по условиям пуска следует учитывать, что момент сопротивления этих механизмов обусловлен силами трения во всех трущихся деталях: каретках, цепи, направляющих роликах, звездочках и т. п. Во время стоянок смазка в этих деталях загустевает и силы трения увеличиваются. За счет этого при пуске момент статического сопротивления выше, чем статический момент при работе механизма, определенный в примере 7.

В расчетах можно принимать, что при пуске статический момент на 30% выше, чем в установившемся режиме работы. В рассматриваемом случае

$$M_{с.п} = 1,3M_c = 1,3 \cdot 36,7 = 47,8 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Требуемый пусковой момент определяется по формуле

$$M_{п.тр} = M_{с.п} + M_{дин}.$$

При пуске конвейеров можно принимать

$$M_{дин} \approx 0,2M_{с.п}.$$

Следовательно, требуемый пусковой момент

$$M_{п.тр} = 1,2M_{с.п} = 1,2 \cdot 47,8 = 57,4 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

По данным двигателя А 52-6 в приложении 1 находим кратность пускового момента:

$$\frac{M_{п}}{M_{н}} = 1,5.$$

Номинальный момент

$$M_{н} = 9550 \frac{P_{н}}{n_{н}} = 9550 \frac{4,5}{950} = 45,2 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент

$$M_{п} = \frac{M_{п}}{M_{н}} M_{н} = 1,5 \cdot 45,2 = 67,8 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Определим наименьший пусковой момент двигателя с учетом возможного снижения напряжения на 10%. Пусковой момент пропорционален квадрату напряжения:

$$M_{п.мин} = \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 M_{п} = 0,9^2 M_{п} = 0,81 M_{п}.$$

В нашем случае

$$M_{п.мин} = 0,81 \cdot 67,8 = 55 \text{ н. м.}$$

Таким образом, двигатель типа А 52-6 не удовлетворяет условиям пуска конвейера, так как

$$M_{п.мин} = 55 \text{ н. м} < M_{п.тр} = 57,4 \text{ н. м.}$$

Установленный на конвейере двигатель типа А 62-6 заменить меньшим двигателем типа А 52-6 нельзя. Для этой цели может быть использован двигатель типа АОП 52-6, обладающий при той же мощности повышенным пусковым моментом.

Второе важное отличие двигателя с короткозамкнутым ротором от двигателя с контактными кольцами связано с потерями энергии, выделяющимися в двигателе во время пусков и торможений.

Потери энергии в сопротивлениях статорной и роторной цепей при пуске зависят от квадрата тока, а также от продолжительности времени пуска. Если сравнить потери энергии при пуске двигателя с контактными кольцами с соответствующими потерями при пуске двигателя с короткозамкнутым ротором, нетрудно заключить, что пусковые потери в короткозамкнутом двигателе больше. Действительно, при одинаковой продолжительности пуска пусковой ток двигателя с короткозамкнутым ротором в 2,5—3,5 раза больше, чем пусковой ток двигателя с кольцами, который ограничивается пусковым реостатом. Следовательно, потери энергии в обмотках статора и ротора за время пуска для двигателя с короткозамкнутым ротором в 6—12 раз выше, чем у двигателя с контактными кольцами. Аналогичные соотношения имеют место и при торможении двигателя с короткозамкнутым ротором путем противовключения (противотоком).

Большие потери при пусках и торможениях асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором вызывают дополнительный нагрев его. При длительном режиме работы, когда двигатель пускается всего несколько раз в смену, этот дополнительный нагрев в среднем не-

велик и практически не сказывается на допустимой нагрузке.

При повторно-кратковременном режиме в зависимости от длительности и характера рабочего цикла двигатель должен включаться от десятков до нескольких сотен и даже тысяч раз в час. Очевидно, в таком режиме большие потери при пусках и торможениях будут оказывать весьма существенное влияние на нагрев двигателя и не учитывать их недопустимо.

Количество энергии, выделяющееся в двигателе за время пуска с нагрузкой на валу, можно подсчитать по приближенной формуле

$$\Delta A_{\text{п}} = 10^{-3} k_{\text{п}} \frac{J_{\Sigma} n_0^2}{182} \cdot \frac{M_{\text{п.ср}}}{M_{\text{п.ср}} - M_{\text{с}}}, \text{ квт} \cdot \text{сек}, \quad (32)$$

где  $J_{\Sigma}$  — суммарный момент инерции на валу двигателя,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$n_0$  — синхронная скорость вращения,  $\text{об}/\text{мин}$ ;

$M_{\text{п.ср}}$  — средний пусковой момент (см. пример 5),  $\text{н} \cdot \text{м}$ ;

$M_{\text{с}}$  — статический момент нагрузки на валу,  $\text{н} \cdot \text{м}$ ;

$k_{\text{п}}$  — коэффициент, зависящий от сопротивления роторной цепи двигателя.

Для двигателей с нормальным исполнением короткозамкнутого ротора  $k_{\text{п}} = 2$ , для двигателей с повышенным скольжением  $k_{\text{п}} = 1,5$ .

За время торможения двигателя путем противовключения (противотоком) количество энергии, выделяющееся в двигателе, можно подсчитать по аналогичной формуле

$$\Delta A_{\text{т}} = 10^{-3} k_{\text{т}} \frac{J_{\Sigma} n_0^2}{182} \cdot \frac{M_{\text{т.ср}}}{M_{\text{т.ср}} + M_{\text{с}}}, \text{ квт} \cdot \text{сек}; \quad (33)$$

здесь  $M_{\text{т.ср}} = 0,9M_{\text{п}}$  — средний тормозной момент двигателя (см. пример 5),  $\text{н} \cdot \text{м}$ ;

$k_{\text{т}} = 6$  — для двигателей с нормальным скольжением;

$k_{\text{т}} = 4,5$  — для двигателей с повышенным скольжением.

В § 6 было отмечено, что нагрев двигателя определяется величиной средних потерь, причем для нормаль-

ных условий нагрева двигателя должно выполняться условие (23):

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{н}}.$$

Средние потери определяются отношением суммарного количества энергии, выделяющегося в двигателе в течение цикла, к продолжительности цикла:

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta A_{\text{цЭ}}}{t_{\text{ц}}}. \quad (34)$$

С увеличением числа включений двигателя в час  $N$  (частоты включений) время цикла уменьшается:

$$t_{\text{ц}} = \frac{3600}{N} \text{ сек.}$$

При большом числе включений  $N$  основную долю в суммарных потерях энергии  $\Delta A_{\text{цЭ}}$  составляют пусковые и тормозные потери  $\Delta A_{\text{п}}$  и  $\Delta A_{\text{т}}$ . Поэтому с увеличением частоты включений средние потери  $\Delta P_{\text{ср}}$  возрастают.

Частота включений, при которой средние потери  $\Delta P_{\text{ср}}$  равны номинальным потерям двигателя  $\Delta P_{\text{н}}$ , называется допустимой частотой включений двигателя при данной нагрузке на валу и данной продолжительности включения.

Увеличить допустимую частоту включений можно либо путем уменьшения нагрузки на валу, либо уменьшением продолжительности включения. Однако возможности увеличения допустимой частоты включений двигателя с короткозамкнутым ротором весьма ограничены вследствие большой величины потерь энергии  $\Delta A_{\text{п}}$  и  $\Delta A_{\text{т}}$ . При некоторой частоте включений двигатель только за счет пусковых и тормозных потерь при  $M_{\text{с}}=0$  будет нагреваться до допустимой температуры и полезной работы совершить не сможет. При этом любая малая полезная нагрузка на его валу увеличит средние потери так, что они станут больше номинальных потерь, и двигатель будет перегреваться выше допустимой температуры.

Допустимая частота включений двигателя вхолостую зависит, с одной стороны, от величины номинальных потерь  $\Delta P_{\text{н}}$ , а с другой — от величины пусковых и тормозных потерь. Увеличение номинальной мощности потерь увеличивает допустимую частоту включений. Увеличение

пусковых и тормозных потерь, напротив, вызывает уменьшение допустимой частоты включений.

Пусковые и тормозные потери с увеличением мощности двигателя при данной скорости вращения возрастают быстрее, чем номинальная мощность потерь. Поэтому с возрастанием мощности двигателя допустимая частота включений быстро уменьшается.

Для двигателей небольшой мощности при работе вхолостую допустимы 500—1 500 включений в час. Для двигателей мощностью выше 50 квт допустимое число включений в час лежит в пределах 15—150. Большие значения допустимой частоты включений соответствуют тихоходным двигателям меньшей мощности, и наоборот. Допустимая частота включений зависит от исполнения двигателя: она выше у двигателей в защищенном исполнении, чем в закрытом. Применение независимой вентиляции двигателя увеличивает допустимую частоту включений.

К выбору двигателей с короткозамкнутым ротором для механизмов, требующих большой частоты включений двигателя, нужно подходить с особой осторожностью. Снижение допустимой частоты включений с увеличением мощности двигателя приводит к тому, что замена перегревающегося двигателя с короткозамкнутым ротором таким же двигателем большей мощности зачастую не дает желаемого результата. Двигатель большей мощности оказывается перегруженным тепловыми потерями еще в большей степени, чем заменяемый.

В подобных случаях нужно подбирать двигатель с большей допустимой частотой включений.

Если перегруженный двигатель имеет самовентиляцию, можно увеличить его допустимую частоту включений путем применения независимой вентиляции. Аналогичный эффект может быть достигнут заменой торможения противовключением двигателя (если оно используется) торможением с помощью механического тормоза. Если эти меры по каким-либо соображениям не могут быть использованы, следует искать двигатель другой серии, обладающий при той же мощности большей допустимой частотой включений.

Большой допустимой частотой включений обладают асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором краново-металлургических серий, специально пред-

назначенные для повторно-кратковременного режима. Эти двигатели имеют относительно меньший момент инерции ротора. Поэтому потери энергии в соответствии с формулами (32) и (33) для этих двигателей при прочих равных условиях меньше.

Из тех же формул можно заключить, что пусковые и тормозные потери меньше у двигателей с повышенным скольжением (АС, АОС).

Если требуемая частота включений выше, чем допустимая для указанных двигателей, то следует заменить асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором асинхронным двигателем с контактными кольцами.

При большой частоте включений выбираемый двигатель с короткозамкнутым ротором следует проверять по формуле средних потерь. Расчет средних потерь при выборе двигателя повторно-кратковременного режима несколько отличается от аналогичного расчета для двигателя длительного режима работы. Разницу можно уяснить из сравнения двух приведенных ниже примеров расчета.

**Пример 14.** Двигатель с короткозамкнутым ротором типа МТК 31-6 предполагается установить на механизме с высокой частотой включений. Цикл работы механизма состоит из двух включений двигателя и двух пауз. При первом включении двигатель работает с нагрузкой на валу  $P_c = P_n$ , при втором  $P_c = 0,3P_n$ . Число циклов в час  $N_n = 120$ . Действительная продолжительность включения ПВ = 30%. Торможение осуществляется механическим тормозом при отключении двигателя. Суммарный момент инерции на валу двигателя  $J_\Sigma = 1,35J_{дв}$ .

Данные двигателя:  $P_n = 11$  квт при ПВ = 25%;  $n_n = 920$  об/мин; к. п. д. при номинальной нагрузке  $\eta_n = 0,81$ ;  $M_{макс}/M_n = 3,4$ ;  $M_n/M_n = 3,2$ ;  $I_n/I_n = 5,1$ ; момент инерции ротора  $J_{дв} = 0,25$  кг·м<sup>2</sup>.

Обратим внимание на то, что число включений двигателя в час в данном случае в 2 раза больше числа циклов в час и составляет  $N = 240$ . При таком числе включений, несмотря на то, что половину времени работы двигатель работает с небольшой нагрузкой на валу, нагрев его может быть недопустимым за счет больших пусковых потерь.

По данным примера 1 для двигателя МТК 31-6

$$\Delta P_{уст1} = \Delta P_n = 2,58 \text{ квт}; \Delta P_{уст2} = \Delta P_{0,3} = 0,815 \text{ квт.}$$

Суммарный момент инерции на валу двигателя

$$J_\Sigma = 1,35J_{дв} = 1,35 \cdot 0,25 = 0,337 \text{ кг·м}^2.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_n = 9550 \frac{P_n}{n_n} = 9550 \frac{11}{920} = 114 \text{ н.м.}$$

Пусковой момент

$$M_{п} = \frac{M_{п}}{M_n} M_n = 3,2 \cdot 114 = 366 \text{ н.м.}$$

Максимальный момент

$$M_{\text{макс}} = 3,4 M_n = 3,4 \cdot 114 = 388 \text{ н.м.}$$

Средний пусковой момент

$$M_{п.ср} = \frac{M_{п} + M_{\text{макс}}}{2} = \frac{366 + 388}{2} = 377 \text{ н.м.}$$

Время цикла

$$t_{ц} = \frac{3600}{N_{ц}} = \frac{3600}{120} = 30 \text{ сек.}$$

Суммарное время работы

$$t_{р1} + t_{р2} = t_{ц} \frac{ПВ}{100} = 30 \frac{30}{100} = 9 \text{ сек.}$$

Примем  $t_{р1} = t_{р2} = 4,5 \text{ сек.}$

Потери энергии за время первого пуска определим по формуле (32), приняв  $k_{п} = 1,5$ , так как двигатель имеет повышенное скольжение ( $s_n = 8\%$ ):

$$\Delta A_{п1} = 10^{-3} \cdot 1,5 \frac{0,337 \cdot 1000^2}{182} \cdot \frac{377}{377 - 114} = 4,0 \text{ квт.сек.}$$

То же при втором пуске

$$\Delta A_{п2} = 10^{-3} \cdot 1,5 \frac{0,337 \cdot 1000^2}{182} \cdot \frac{377}{377 - 0,3 \cdot 114} = 3,06 \text{ квт.сек.}$$

Средние за суммарное время работы потери, соответствующие действительной продолжительности включения  $ПВ = 30\%$ , подсчитываются по формуле

$$\begin{aligned} \Delta P_{ср 30\%} &= \frac{\Delta A_{п1} + \Delta P_{уст 1} t_{уст 1} + \Delta A_{п2} + \Delta P_{уст 2} t_{уст 2}}{t_{р1} + t_{р2}} = \\ &= \frac{4,0 + 2,58 \cdot 4,5 + 3,06 + 0,815 \cdot 4,5}{4,5 + 4,5} = 2,38 \text{ квт.} \end{aligned}$$

Здесь с целью упрощения приближенно принято  $t_{уст 1} = t_{уст 2} \approx t_{р1}$ .

Номинальная мощность потерь  $\Delta P_n = 2,58 \text{ кВт}$  соответствует режиму  $PB_n = 25\%$ . Чтобы получить возможность сравнивать потери, нужно привести средние потери  $\Delta P_{\text{ср } 30\%}$  к номинальной продолжительности включения по формуле

$$\Delta P_{\text{ср } 25\%} = \Delta P_{\text{ср } 30\%} \frac{PB}{PB_n} = 2,38 \frac{30}{25} = 2,86 \text{ кВт.}$$

Таким образом, двигатель при работе по данному циклу будет перегреваться, так как для него

$$\Delta P_{\text{ср } 25\%} = 2,86 \text{ кВт} > \Delta P_{n \text{ } 25\%} = 2,58 \text{ кВт.}$$

Отметим, что если бы в данном случае использовалось торможение противовключением, в числитель формулы средних потерь  $\Delta P_{\text{ср } 30\%}$  следовало бы прибавить потери при торможениях  $\Delta A_{\tau 1}$  и  $\Delta A_{\tau 2}$ , подсчитанные по формуле (33). При этом перегрузка двигателя по нагреву была бы еще более значительной.

Для упрощения расчетов при проверке по нагреву наиболее распространенных короткозамкнутых двигателей единой серии в приложении 1 приведены значения потерь энергии в этих двигателях при пуске вхолостую (без связи с механизмом)  $\Delta A_{\text{п}0}$  и при торможении противовключением в таких же условиях  $\Delta A_{\text{т}0}$ .

Особенности использования этих данных и проверки по нагреву двигателей для длительного режима работы с самовентиляцией поясняются следующим примером.

**Пример 15.** Требуется проверить по нагреву установленный на приводе шпинделя токарного станка (см. пример 2) асинхронный двигатель типа АО 51-4. Будем полагать, что остановка шпинделя может быть осуществлена только путем отключения двигателя, причем для быстрой остановки используется торможение противовключением двигателя.

Цикл работы механизма: пуск двигателя вхолостую; резание с нагрузкой  $P_{\text{с}1} = 4,22 \text{ кВт}$ ; торможение двигателя противовключением вхолостую; пауза; второй пуск двигателя вхолостую; резание с нагрузкой  $P_{\text{с}2} = 3,16 \text{ кВт}$ ; торможение противовключением; пауза.

По данным технологов, время резания на первом участке цикла  $t_{\text{м}1} = 120 \text{ сек}$ , на втором  $t_{\text{м}2} = 95 \text{ сек}$ . Времена пауз:  $t_{\text{п}1} = 6 \text{ сек}$ ;  $t_{\text{п}2} = 20 \text{ сек}$ . По данным примера 2:  $M_{\text{с}1} = 28 \text{ н·м}$ ;  $M_{\text{с}2} = 21 \text{ н·м}$ .

По данным примера 5 время пуска и торможения  $t_{\text{п}0} = 0,15 \text{ сек}$ ;  $t_{\text{т}0} = 0,2 \text{ сек}$ ;  $t_{\text{п}1} = t_{\text{п}2} = 0,202 \text{ сек}$ ;  $t_{\text{т}1} = t_{\text{т}2} = 0,228 \text{ сек}$ .

Определим мощность потерь при различных нагрузках. Для этого подсчитаем коэффициент загрузки двигателя для первого и второго рабочего участков цикла:

$$k_{\text{в}1} = \frac{P_{\text{с}1}}{P_n} = \frac{4,22}{4,5} = 0,94; \quad k_{\text{в}2} = \frac{P_{\text{с}2}}{P_n} = \frac{3,16}{4,5} = 0,69.$$

Находим соответствующие к. п. д. для двигателя АО 51-4 аналогично тому, как было сделано в примере 1:

$$\eta_1 = 0,855; \eta_2 = 0,86.$$

Потери в двигателе при резании:

$$\Delta P_{уст1} = P_{с1} \frac{1 - \eta_1}{\eta_1} = 4,22 \frac{1 - 0,855}{0,855} = 0,72 \text{ квт.}$$

$$\Delta P_{уст2} = P_{с2} \frac{1 - \eta_2}{\eta_2} = 3,16 \frac{1 - 0,86}{0,86} = 0,5 \text{ квт.}$$

Потери энергии за время каждого пуска

$$\Delta A_{п} = \Delta A_{п0} \frac{t_{п}}{t_{п0}} = 1,7 \frac{0,202}{0,15} = 2,41 \text{ квт.сек.}$$

То же при каждом торможении

$$\Delta A_{т} = \Delta A_{т0} \frac{t_{т}}{t_{т0}} = 3,7 \frac{0,228}{0,2} = 4,2 \text{ квт.сек.}$$

Здесь значения  $\Delta A_{п0}$  и  $\Delta A_{т0}$  найдены по данным двигателя в таблице приложения 1.

Средние потери за время цикла с учетом того, что двигатель имеет самовентиляцию,

$$\begin{aligned} \Delta P_{ср} &= \frac{2\Delta A_{п} + 2\Delta A_{т} + \Delta P_{уст1}t_{м1} + \Delta P_{уст2}t_{м2}}{0,5(t_{01} + t_{02}) + 0,75(2t_{п1} + 2t_{т1}) + t_{м1} + t_{м2}} = \\ &= \frac{2 \cdot 2,41 + 2 \cdot 4,2 + 0,72 \cdot 120 + 0,5 \cdot 95}{0,5(6 + 20) + 0,75(2 \cdot 0,202 + 2 \cdot 0,228) + 120 + 95} = 0,645 \text{ квт.} \end{aligned}$$

Здесь уменьшение времени пауз и переходных процессов умножением на коэффициенты соответственно 0,5 и 0,75 учитывает, что двигатель имеет самовентиляцию (см. пример 12).

Номинальные потери двигателя АО 51-4

$$\Delta P_{н} = P_{н} \frac{1 - \eta_{н}}{\eta_{н}} = 4,5 \frac{1 - 0,855}{0,855} = 0,762 \text{ квт.}$$

Следовательно, двигатель загружен по нагреву нормально, так как

$$\Delta P_{ср} = 0,645 \text{ квт} < \Delta P_{н} = 0,762 \text{ квт.}$$

Проверки по перегрузочной способности и пусковому моменту в данном случае не требуется, так как  $M_{с1} < M_{п}$ , а пуск осуществляется при холостом ходе станка,

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЕДИНОЙ СЕРИИ<sup>1</sup> (А и АО)

Тип двигателя	$P_{\text{н}}, \text{квт}$	$n_{\text{н}}, \text{об/мин}$	$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$	$J_{\text{дв}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$t_{\text{по}}, \text{сек}$	$t_{\text{то}}, \text{сек}$	$\Delta A_{\text{по}}, \text{квт}\cdot\text{сек}$	$\Delta A_{\text{то}}, \text{квт}\cdot\text{сек}$
<b>В защищенном исполнении (типов А и АЛ), 3000 об/мин (синхр.)</b>									
31-2	1,0	2850	2,2	1,8	0,002	0,09	0,11	0,38	0,83
32-2	1,7	2850	2,4	2,0	0,0035	0,08	0,10	0,66	1,21
41-2	2,8	2870	2,2	1,6	0,006	0,10	0,14	1,02	1,62
42-2	4,5	2870	2,4	1,8	0,0085	0,08	0,11	1,65	2,40
51-2	7,0	2890	2,2	1,5	0,0275	0,20	0,27	2,58	3,90
52-2	10,0	2890	2,4	1,6	0,04	0,18	0,26	2,70	7,55
61-2	14,0	2920	2,5	1,2	0,0675	0,24	0,42	5,96	12,4
62-2	20,0	2920	2,7	1,3	0,0875	0,20	0,35	8,50	19,0
71-2	28,0	2930	2,2	1,0	0,143	0,30	0,53	12,0	25,6
<b>1500 об/мин (синхр.)</b>									
31-4	0,6	1410	2,0	1,7	0,0033	0,06	0,08	0,11	0,23
32-4	1,0	1410	2,0	1,8	0,0048	0,05	0,07	0,16	0,38
41-4	1,7	1420	2,0	1,8	0,0105	0,07	0,09	0,32	0,66
42-4	2,8	1420	2,0	1,9	0,0150	0,06	0,07	0,55	1,08
51-4	4,5	1440	2,0	1,4	0,0425	0,13	0,17	0,88	1,80
52-4	7,0	1440	2,0	1,5	0,0625	0,12	0,15	2,14	4,24
61-4	10,0	1450	2,0	1,2	0,09	0,13	0,20	2,67	4,4
62-4	14,0	1450	2,0	1,3	0,12	0,12	0,17	4,11	6,5
71-4	20,0	1450	2,0	1,1	0,24	0,18	0,28	5,70	9,7
72-4	28,0	1450	2,0	1,2	0,30	0,15	0,23	6,22	16,8

<sup>1</sup> Полные технические данные по электродвигателям можно найти в каталогах [Л. 5].

## Продолжение приложения 1

Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$\frac{M_{\max}}{M_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	$J_{дв}$ , кг-м <sup>2</sup>	$t_{по}$ , сек	$t_{то}$ , сек	$\Delta A_{по}$ , кат-сек	$\Delta A_{то}$ , кат-сек
<b>1 000 об/мин (синхр.)</b>									
41-6	1,0	930	1,8	1,3	0,0105	0,06	0,09	0,13	0,31
42-6	1,7	930	1,8	1,4	0,0150	0,05	0,07	0,23	0,59
51-6	2,8	950	1,8	1,3	0,0425	0,10	0,13	0,49	1,12
52-6	4,5	950	1,8	1,5	0,0625	0,08	0,10	0,86	1,94
61-6	7,0	970	1,8	1,1	0,090	0,09	0,13	1,49	2,81
62-6	10,0	970	1,8	1,1	0,120	0,08	0,13	2,45	3,94
71-6	14,0	970	1,8	1,2	0,375	0,18	0,26	3,45	6,85
72-6	20,0	970	1,8	1,2	0,475	0,16	0,23	5,23	10,9
81-6	28,0	975	1,8	1,2	0,8	0,20	0,28	8,0	15,2
<b>750 об/мин (синхр.)</b>									
61-8	4,5	730	1,7	1,0	0,180	0,17	0,25	0,75	1,59
62-8	7,0	730	1,7	1,0	0,230	0,14	0,21	1,29	2,45
71-8	10,0	730	1,7	1,1	0,375	0,16	0,22	2,20	3,73
72-8	14,0	730	1,7	1,1	0,475	0,14	0,20	2,90	5,16
81-8	20,0	730	1,7	1,1	0,80	0,17	0,24	4,28	8,12
82-8	28,0	730	1,7	1,2	1,02	0,15	0,20	6,25	12,45
<b>В закрытом обдуваемом исполнении (типов АО и АОЛ), 3 000 об/мин (синхр.)</b>									
31-2	0,6	2 860	2,4	2,0	0,0025	0,17	0,21	0,33	0,74
32-2	1,0	2 860	2,6	2,2	0,0040	0,15	0,19	0,54	1,18
41-2	1,7	2 880	2,4	1,8	0,0075	0,19	0,25	0,95	2,10
42-2	2,8	2 880	2,5	1,9	0,0100	0,15	0,19	1,45	3,30
51-2	4,5	2 900	2,4	1,6	0,0300	0,31	0,43	4,4	7,95
52-2	7,0	2 900	2,5	1,7	0,0425	0,27	0,37	6,9	10,2
62-2	10,0	2 930	2,5	1,3	0,103	0,50	0,83	14,7	36,3
63-2	14,0	2 930	2,9	1,5	0,125	0,37	0,63	20,9	54,1
72-2	20,0	2 940	2,9	1,2	0,19	0,40	0,83	31,0	77,5

Тип двигателя	$P_H$ , квт	$n_H$ , об/мин	$\frac{M_{\max}}{M_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	$t_{по}$ , сек	$t_{т0}$ , сек	$\Delta A_{по}$ , квт·сек	$\Delta A_{т0}$ , квт·сек
<b>1500 об/мин (синхр.)</b>									
31-4	0,6	1410	2,0	1,7	0,0038	0,07	0,09	0,10	0,23
32-4	1,0	1410	2,0	1,8	0,0053	0,06	0,07	0,14	0,30
41-4	1,7	1420	2,0	1,8	0,012	0,08	0,10	0,33	0,77
42-4	2,8	1420	2,0	1,9	0,017	0,07	0,08	0,5	1,13
51-4	4,5	1440	2,0	1,4	0,05	0,15	0,20	1,7	3,7
52-4	7,0	1440	2,0	1,5	0,07	0,13	0,17	2,5	5,7
62-4	10,0	1460	2,3	1,3	0,15	0,19	0,30	5,4	11,0
63-4	14,0	1460	2,3	1,4	0,19	0,17	0,25	7,4	14,5
72-4	20,0	1460	2,3	1,3	0,38	0,24	0,38	10,6	21,6
<b>1000 об/мин (синхр.)</b>									
41-6	1,0	930	1,8	1,3	0,012	0,07	0,10	0,12	0,3
42-6	1,7	930	1,8	1,4	0,017	0,06	0,08	0,20	0,48
51-6	2,8	950	1,8	1,3	0,05	0,11	0,16	0,62	1,50
52-6	4,5	950	1,8	1,5	0,07	0,09	0,12	1,0	2,25
62-6	7,0	980	2,2	1,4	0,15	0,12	0,18	3,6	7,1
63-6	10,0	980	2,2	1,4	0,19	0,11	0,15	5,1	9,6
72-6	14,0	980	2,2	1,4	0,58	0,24	0,34	9,4	10,5
73-6	20,0	980	2,2	1,4	0,75	0,22	0,31	10,6	18,4
<b>750 об/мин (синхр.)</b>									
62-8	4,5	735	2,0	1,5	0,25	0,19	0,24	1,67	3,44
63-8	7,0	735	2,0	1,5	0,33	0,16	0,20	2,54	5,18
72-8	10,0	735	2,0	1,3	0,58	0,20	0,29	3,56	7,44
73-8	14,0	735	2,0	1,3	0,75	0,20	0,27	5,3	11,1
82-8	20,0	735	2,0	1,4	1,1	0,19	0,26	7,9	17,4

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

а) ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КРАНОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОНТАКТНЫМИ КОЛЬЦАМИ СЕРИЙ МТ и МТВ 50 гц, 220/380 и 500 в

Тип двигателя	Закрытые с внешним обдувом, ПВ=25%			$I_{дв}$ кг-м <sup>2</sup>
	$P_n$ , квт	$n_n$ , об/мин	$M_{макс}/M_n$	

1. Двигатели, выпускавшиеся до 1963 г.

МТ 11-6	2,2	885	2,3	0,043
МТ 12-6	3,5	910	2,5	0,068
МТ 21-6	5,0	940	2,9	0,103
МТ 22-6	7,5	945	2,8	0,143
МТ 31-6	11,0	953	3,1	0,26
МТ 31-8	7,5	702	2,6	0,26
МТ 41-8	11,0	715	2,9	0,47
МТ 42-8	16,0	718	3,3	0,68
МТ 51-8	22,0	723	3,0	1,10
МТ 52-8	30,0	725	3,0	1,43
МТ 61-10	30,0	574	3,3	3,3
МТ 62-10	45,0	577	3,2	4,38
МТ 63-10	60,0	577	2,9	5,5
МТ 71-10	80,0	582	3,3	10,0
МТ 72-10	100	584	3,3	12,0
МТ 73-10	125	585	3,4	13,3

2. Выпускаются в настоящее время

МТ 011-6	1,4	885	2,3	0,021
МТ 012-6	2,2	890	2,3	0,029
МТ 111-6	3,5	905	2,3	0,049
МТ 112-6	5,0	920	2,4	0,068
МТ 211-6	7,5	935	2,5	0,115
МТВ 311-6	11,0	950	2,8	0,225
МТВ 312-6	16,0	960	2,8	0,312
МТВ 411-6	22,0	965	2,8	0,50
МТВ 412-6	30,0	970	2,8	0,68
МТВ 311-8	7,5	695	2,5	0,28
МТВ 312-8	11,0	710	2,8	0,39
МТВ 411-8	16,0	710	2,8	0,54
МТВ 412-8	22,0	715	2,8	0,75
МТВ 511-8	30,0	720	2,8	1,07
МТВ 512-8	40,0	725	2,9	1,42
МТВ 611-10	45,0	575	3,0	4,25
МТВ 612-10	60,0	578	3,0	5,25
МТВ 613-10	80,0	580	3,0	6,25
МТВ 711-10	100	584	2,8	10,3
МТВ 712-10	125	587	2,8	12,8
МТВ 713-10	160	587	2,8	15,0

**б) ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КРАНОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ СЕРИЙ МТК и МТКВ 50 *гц*, 220/380 и 500 *в***

Тип двигателя	Закрытые с внешним обдувом, ПВ=25%					Допустимое число пусков в час при работе вхолостую	$J_{дв}^*$ кг·м <sup>2</sup>
	$P_{н}$ квт	$n_{н}$ об/мин	$\frac{M_{макс}}{M_{н}}$	$\frac{M_{п}}{M_{н}}$	$\frac{I_{п}}{I_{н}}$		

**1. Двигатели, выпускавшиеся до 1963 г.**

МТК 11-6	2,2	883	2,6	2,6	3,3	1 600	0,040
МТК 12-6	3,5	875	2,6	2,6	3,6	1 600	0,063
МТК 21-6	5,0	910	3,1	2,9	4,3	1 100	0,097
МТК 22-6	7,5	905	3,1	3,0	4,4	900	0,138
МТК 31-6	11,0	920	3,4	3,2	5,1	750	0,25
МТК 31-8	7,5	682	3,0	2,9	4,5	1 200	0,25
МТК 41-8	11,0	685	3,2	3,0	4,5	900	0,45
МТК 42-8	16,0	685	3,3	3,1	4,8	800	0,65
МТК 51-8	22,0	692	3,1	2,8	5,0	550	1,05
МТК 52-8	28,0	695	3,2	2,8	5,2	550	1,38

**2. Выпускаются в настоящее время**

МТК 011-6	1,4	840	2,6	2,6	3,1	} Данных нет	0,020
МТК 012-6	2,2	830	2,6	2,6	3,2		0,028
МТК 111-6	3,5	875	2,7	2,7	3,8		0,045
МТК 112-6	5,0	875	2,9	2,9	3,9		0,065
МТК 211-6	7,5	880	2,7	2,5	3,9		0,11
МТКВ 311-6	11,0	900	2,9	2,8	4,3		0,21
МТКВ 312-6	16,0	900	3,0	2,9	4,8		0,30
МТКВ 411-6	22,0	935	2,8	2,8	4,5		0,48
МТКВ 412-6	30,0	935	2,8	2,8	4,5		0,64
МТКВ 311-8	7,5	670	2,7	2,6	4,2		0,28
МТКВ 312-8	11,0	680	3,0	2,8	4,3		0,39
МТКВ 411-8	16	685	2,9	2,8	4,6		0,54
МТКВ 412-8	22	690	2,9	2,8	5,2		0,75
МТКВ 511-8	28	710	3,1	3,0	5,0		1,08
МТКВ 512-8	37	705	3,1	3,0	5,3		1,42

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

**КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ И ПОДШИПНИКОВ**

Цилиндрическая зубчатая передача с прямыми зубьями:

- а) шлифованные зубья . . . . . 0,99
- б) нарезанные зубья . . . . . 0,98
- в) необработанные зубья . . . . . 0,96

Цилиндрическая с косыми зубьями . . . . . 0,97—0,98

Цилиндрическая с шевронными зубьями . . . . . 0,985

Коническая зубчатая передача . . . . .	0,97—0,98
Ремennая передача . . . . .	0,94—0,98
Клиноременная передача . . . . .	0,80—0,98
Цепная передача . . . . .	0,98
Фрикционная передача . . . . .	0,70—0,80
Блоки . . . . .	0,96—0,97
Полиспасты . . . . .	0,92—0,98
Барабан цепной . . . . .	0,97
Подшипник скольжения . . . . .	0,94—0,98
Шариковый подшипник . . . . .	0,99

### ЛИТЕРАТУРА

1. Санджер А. С., Электрооборудование производственных механизмов, Госэнергоиздат, 1958.
2. Соколов М. М., Электрооборудование общепромышленных механизмов, Госэнергоиздат, 1959.
3. Ильинский Н. Ф., Расчет и выбор сопротивлений для электродвигателей, Госэнергоиздат, 1959.
4. Константинов Б. А., Соколов К. И. и Шулятьева Г. Н., Коэффициент мощности  $\cos \varphi$  и способы его улучшения на промышленных предприятиях, Госэнергоиздат, 1959.
5. Единая серия. Асинхронные электродвигатели, ЦБТИ МЭП, Каталог № 1131, 1132.
6. Таблица цифровых данных коэффициентов полезного действия (к. п. д.) и коэффициентов мощности ( $\cos \varphi$ ) электродвигателей единой серии типа А (АЛ) в зависимости от нагрузки [ $\eta = f(P)$ ;  $\cos \varphi = f(P)$ ]. ЦБТИ МЭП.

Цена 16 коп.

## ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ

- Ашкецази Г. И. и др. Электрооборудование театральнo-зрелищных зданий. Госэнергоиздат, 1961 г. 35 стр. (Б-ка электромонтера. Вып. 57) 10 к.
- Демчев В. И. и Царьков В. М., Проекторное освещение.  
• Госэнергоиздат, 1962 г. 60 стр. (Б-ка электромонтера. Вып. 61) 11 к.
- Дормакович П. А. и др. Изготовление и обслуживание газосветных установок. Госэнергоиздат, 1962 г. 50 стр. (Б-ка электромонтера. Вып. 72), 12 к.
- Иевлев В. И. и Рябцев Ю. И., Монтаж трансформаторов напряжением 500 кв. Госэнергоиздат, 1961 г. 39 стр. (Б-ка электромонтера. Вып. 52), 8 к.
- Кастанович М. М. Как работают провода, изоляторы и арматура линий электропередачи. Госэнергоиздат, 1962 г. 63 стр. (Б-ка электромонтера. Вып. 63), 13 к.
- Камнев В. С. Подшипники качения в электрических машинах. Госэнергоиздат, 1960 г. 62 стр. (Б-ка электромонтера. Вып. 20), 15 к.
- Колузаев А. М. Ремонт и обслуживание быстродействующих выключателей типа ВАБ-2. Госэнергоиздат, 1962 г. 47 стр. (Б-ка электромонтера. Вып. 75), 9 к.
- Мусаэлян Э. С. Проверки и испытания при монтаже турбогенераторов. Госэнергоиздат, 1962 г. 79 стр. (Б-ка электромонтера. Вып. 66), 15 к.
- Плетнев Л. Ф. Реле прямого действия, их наладка и проверка. Госэнергоиздат, 1961 г. 46 стр. (Б-ка электромонтера. Вып. 48)
- Харитонов М. Г. Опыт обслуживания и ремонта КРУ Запорожского завода. Госэнергоиздат, 1960 г. (Б-ка электромонтера. Вып. 17), 9 к.
- Чернев К. К. Обслуживание распределительных устройств высокого напряжения. Госэнергоиздат, 1961 г. 55 стр. (Б-ка электромонтера. Вып. 47), 11 к.

Перечисленные выше книги требуются в магазинах Книготорга. В случае их отсутствия в местных магазинах, заказ можно направить по адресу: Москва, К-50, ул. Медведева 1, отдел «Книга — почтой» магазина № 8 «Техническая книга». Заказ будет выполнен наложенным платежом. Издательство заказов на книги не принимает и книг не высылает.