БИБЛИОТЕКА
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

ВЫПУСК 393

В. И. КЛЮЧЕВ

ВЫБОР ЭЛЕКТРО-ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Издание третье

«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1974

6П2.1
К 52
УДК 621.313.13

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Большам Я. М., Зевакин А. И., Каминский Е. А., Мандрыкин С. А., Мусаэлян Э. С., Розанов С. П., Семенов В. А., Синьчугов Ф. И., Смирнов А. Д., Соколов Б. А., Устинов П. И.

Ключев В. И.

К 52 Выбор электродвигателей для производственных механизмов. Изд. 3-е, М., «Энергия», 1974.

96 с. с ил. (Б-ка электромонтера, вып. 393).

В книге излагаются методы выбора электродвигателей к производственным механизмам. Приведены сведения об основных видах электрических деталей, их свойствах и режимах работы, рассмотрены методы определения нагрузок электроприводов. Основные положения поясняются примерами расчета.

В настоящем, третьем, издании ряд разделов книги переработан в направлении расширения сведений о наиболее распространенных типах электрических двигателей и о методах экспериментальной проверки загрузки электрических двигателей в условиях эксплуатации.

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

К $\frac{3310\text{-}053}{051(01)\text{-}74}$ 119-74

© Издательство «Энергия», 1974 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электродвигатель является основным элементом электрического привода производственного механизма. Соответствие его конструктивных и технических данных условиям работы механизма является необходимым требованием, выполнение которого обеспечивает минимальную стоимость электрооборудования, высокую надежность работы и наименьшие потери электроэнергии в эксплуатации.

Выбор электрических двигателей осуществляется на стадии проектирования электрических приводов. Этот этап требует особого внимания, ибо от правильного выбора типа, исполнения и мощности электродвигателя, кроме указанных факторов, непосредственно зависят управляемость электропривода, его регулировочные свойства и, в конечном счете, производительность механизма. Для правильного решения этих вопросов необходимы глубокие знания в области механики, электромеханики и теории автоматизированного электропривода. Поэтому выбор электродвигателей при проектировании производится высококвалифицированными специалистами-электриками совместно с конструкторами механического оборудования.

Однако необходимость выбора двигателей возникает достаточно часто и в процессе эксплуатации. Решать эту задачу приходится электрикам промышленных предприятий при замене установленных на механизмах двигателей. Необходимость замены возникает, например, в соответствии с графиком планово-предупредительных ремонтов, а также в случае выхода двигателей из строя или несоответствия параметров установленного двигателя требованиям приводимого в движение механизма. Подобные несоответствия могут возникать вследствие изменений темпа работы или загрузки механизма, связанных с соответствующими изменениями в технологическом процессе.

Наиболее просто выбор двигателя в эксплуатации осуществляется в тех случаях, когда достоверно известно, что заменяемый двигатель загружен нормально. При этом задача сводится к подбору двигателя, по всем показателям аналогично заменяемому. Выполнение даже такой простейшей операции может быть грамотно выполнено только персоналом, имеющим необходимый ми-

нимум знаний об особенностях, исполнениях двигателей и о физическом смысле их паспортных данных. Значительно усложняется выбор двигателей в тех случаях, когда их приходится заменять в связи с опасной перегрузкой или значительной недогрузкой при работе. При этом возникает необходимость уточнения требуемой мощности двигателя, которое требует от электротехнического персонала умения производить несложные расчеты на базе каталожных данных двигателя и механизма, а также с помощью экспериментальных данных.

Данная книга посвящена изложению основных положений, знание которых необходимо электротехническому персоналу промышленных предприятий, не имеющему специального образования, для осуществления грамотной эксплуатации электрических двигателей и правильного их выбора. К их числу относятся краткие сведения об устройстве и электромеханических свойствах различных видов двигателей, разъяснение физического смысла основных данных двигателей, сведения о нагрузках электроприводов и рекомендации по расчету их в различных практических случаях. Значительное внимание уделено рассмотрению методов проверки двигателей по нагреву с помощью расчетных или экспериментальных нагрузочных диаграмм электропривода, а также особенностям выбора наиболее распространенных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Написание такого технического пособия, рассчитанного на широкий круг читателей, является трудной задачей, поскольку теоретическая подготовка и практический опыт читателей весьма различны, а вопросы выбора двигателей являются сложными и далеко не во всех случаях поддаются популярному изложению. При изложении материала автор стремился к его возможному упрощению при сохранении достаточной технической строгости, ориентируясь на читателя, который хорошо владеет основными сведениями из физики и математики в объеме средней школы и в то же время имеет некоторый опыт практической работы по эксплуатации электроприводов производственных механизмов.

Все замечания и пожелания следует направлять по адресу: Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, изд-во «Энергия».

Автор

1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Подавляющее большинство современных рабочих машин имеет так называемый индивидуальный электрический привод, при котором для осуществления каждого рабочего движения машины предусматривается один либо несколько электрических двигателей. Примером машины с индивидуальным электроприводом основных механизмов может служить мостовой кран, в котором подъем и опускание крюка осуществляются двигателем подъемной лебедки, передвижение тележки с подъемной лебедкой вдоль моста крана — двигателем механизма передвижения тележки, а перемещение моста крана вдоль подкрановых путей производится одним или двумя двигателями механизма передвижения моста.

Основным назначением электропривода является приведение в движение рабочего органа машины. При индивидуальном электроприводе его функции в значительной степени расширяются, так как управление рабочим процессом механизма осуществляется воздействием на электрический двигатель. По условиям технологии требуется пускать механизм в ход, регулировать его скорость движения, изменять направление движения, останавливать механизм, причем зачастую в строго определенных положениях и т. п. С этой целью производятся пуски, реверсы, торможения двигателя, тем или иным способом регулируется его скорость, воздействием на двигатель обеспечивается автоматизация отдельных операций или всего технологического процесса.

Производственные механизмы чрезвычайно многообразны как в конструктивном отношении, так и в отношении режимов работы. Соответственно многообразны и технические требования, предъявляемые к конкретным электроприводам. Так, например, двигатели насосов, вентиляторов, компрессоров, ленточных, цепных конвейеров и других механизмов непрерывного действия работают

продолжительно без остановок, поэтому их пуски и торможения являются редкими вспомогательными операциями. Напротив, двигатели механизмов циклического действия (подъемные краны, лифты, экскаваторы и т. п.) работают в режиме частых пусков и торможений. В каждой из рассмотренных групп и между ними возможны существенные различия в требованиях, предъявляемых к электроприводам в отношении регулирования скоростей, в характере нагрузок, создаваемых механизмом на валу двигателя и в пределах их изменения в процессе работы механизма. Очевидно, например, что двигатель центробежного вентилятора имеет стабильную нагрузку на валу, а двигатель подъемной лебедки экскаватора-лопаты при работе испытывает нагрузки, изменяющиеся в очень широких пределах.

Для того чтобы удовлетворить разнообразным требованиям практики, электропромышленностью выпускаются двигатели различной конструкции и назначения. Их различают по следующим основным признакам: роду тока и напряжения питающей сети; исполнению электрической схемы и виду характеристик; назначению; способу защиты от воздействия окружающей среды; способу установки и крепления на механизме.

По роду тока двигатели разделяются на двигатели постоянного и переменного тока. Рассмотрим основные конструктивные особенности и электромеханические свойства их разновидностей, наиболее распространенных на промышленных предприятиях.

Конструктивная схема двухполюсного двигателя постоянного тока представлена на рис. 1. Якорь машины *1*, вращающийся в подшипниках, помещен в магнитное поле, создаваемое обмоткой возбуждения двигателя *2*, расположенной на главных полюсах машины *3*. Ток возбуждения $I_в$, проходящий по обмотке *2*, создает н. с., под действием которой возникает поток Ф, который замыкается по контуру: главные полюсы *3*, якорь машины *1*, магнитопровод станины *4*.

В пазах якоря уложена силовая обмотка якоря, концы отдельных секций которой выведены на коллектор. К нему подводится ток якоря $I_я$ от питающей сети через щетки *5*. На рис. 1 проводники якоря показаны условно распределенными по поверхности якоря, ламели коллектора не показаны и ток $I_я$ для большей наглядности подводится щетками *5* непосредственно к проводникам обмотки якоря. В результате взаимодействия проходящего по проводникам якоря тока $I_я$ с магнитным потоком Ф возникает электромагнитный момент машины (Н·м)

$$M = k\Phi I_я, \qquad (1)$$

где k — конструктивный коэффициент; Ф — поток, Вб; $I_я$ — ток якоря, А.

Как видно из схемы, при вращении якоря ток в проводнике якоря, проходящем под щеткой, меняет свое направление — происходит процесс так называемой коммутации тока коллектором. Вследствие явления самоиндукции и по ряду других причин коммутация тока на

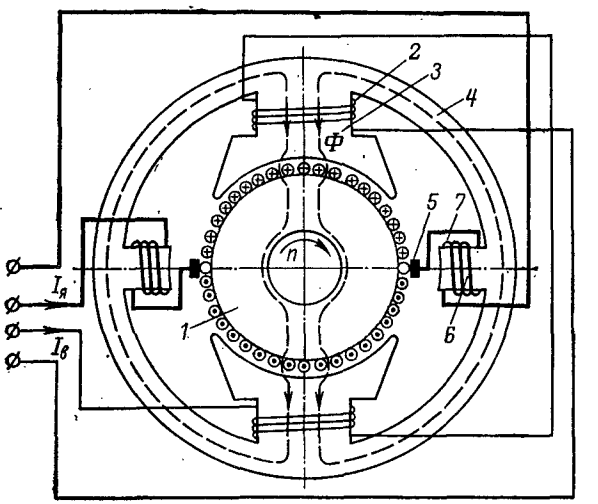


Рис. 1. Конструктивная схема двигателя постоянного тока.

коллекторе может сопровождаться искрением, а при неблагоприятных условиях вызывать перекрытие коллектора дугой («круговой огонь»), которое приводит к выходу машины из строя. Для нормальной коммутации тока проводник в зоне коммутации должен находиться в магнитном поле определенного направления и величины. Такое поле в зоне коммутации создается предусмотренными для этой цели дополнительными полюсами машины *6*. Обмотка дополнительных полюсов *7* вклю-

чается последовательно с обмоткой якоря и обтекается током $I_я$.

При вращении якоря в витках его обмотки наводится переменная э. д. с. (В), которая выпрямляется коллектором и имеет результирующую величину

$$E = k\Phi\omega, \qquad (2)$$

где ω — угловая скорость вращения, рад/с.

Ток якорной цепи (А) определяется по формуле

$$I_я = \frac{U - E}{R_{яΣ}}, \qquad (3)$$

где U — напряжение сети, В; $R_{яΣ}$ — суммарное сопротивление всех последовательно соединенных элементов якорной цепи.

При пуске двигателя скорость ω и э. д. с. E в первый момент равны нулю и в якорной цепи протекает ток короткого замыкания

$$I_к = U/R_{яΣ}.$$

Так как сопротивление якорной цепи двигателя при отсутствии внешних добавочных сопротивлений очень мало, при включении двигателя на полное напряжение сети ток $I_к$ может иметь недопустимо большую величину. Для ограничения пускового тока либо понижают подводимое к двигателю напряжение (если двигатель получает питание от отдельного управляемого преобразователя), либо в якорную цепь вводят пусковое сопротивление $R_п$. По мере увеличения скорости двигателя его противо-э. д. с. E возрастает и ток уменьшается. Поэтому в процессе пуска постепенно повышают напряжение или выводят пусковое сопротивление в якорной цепи.

Электромеханические свойства двигателей, наиболее важные для механизмов, проявляются в зависимости скорости вращения двигателя от нагрузки на его валу. Так как нагрузка на валу непосредственно определяет величину момента M, развиваемого двигателем, эти свойства полностью зависят от формы так называемой механической характеристики двигателя $\omega = f(M)$. Уравнение этой характеристики для двигателя постоянного тока можно получить с помощью (1)—(3)

$$\omega = \omega_0 - M\frac{R_{яΣ}}{k^2\Phi^2}.$$

На практике более привычно выражать скорость в оборотах в минуту и обозначать буквой n. В дальнейшем используется это обозначение, поэтому уравнение механической характеристики следует записать в виде

$$n = n_0 - 9{,}55\,M\frac{R_{яΣ}}{k^2\Phi^2}, \qquad (4)$$

так как $n = 30\omega/\pi = 9{,}55\omega$ об/мин.

В уравнении (4) величина n_0 есть скорость вращения двигателя на холостом ходу ($M = 0$), которая определяется по формуле

$$n_0 = 9{,}55\,U/k\Phi. \qquad (5)$$

В соответствии с (4) электромеханические свойства двигателя постоянного тока существенно зависят от способа его возбуждения (рис. 2).

На рис. 2,*а* представлена схема включения двигателей с независимым возбуждением, которые на практике иногда называются шунтовыми. Обмотка *ОВ* главных полюсов такого двигателя имеет большое число витков относительно тонкого провода и рассчитана на непосредственное подключение к питающей сети. В процессе работы ток возбуждения $I_в$ устанавливается с помощью реостата *РВ* и остается постоянным независимо от нагрузки двигателя. При этом поток машины постоянен и скорость холостого хода n_0 не изменяется. При увеличении нагрузки на валу момент M увеличивается, поэтому в соответствии с (4) скорость двигателя n уменьшается. Однако при выведенном пусковом реостате *РП* сопротивление $R_{яΣ}$ весьма мало и скорость в рабочих пределах изменения нагрузки можно считать примерно постоянной. В этом можно убедиться, рассматривая приведенную на рис. 3

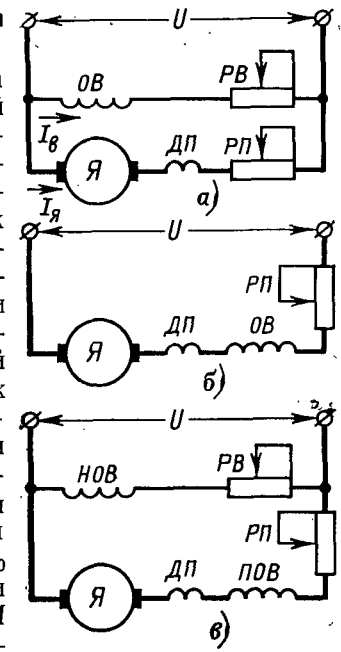


Рис. 2. Схемы включения двигателей постоянного тока.

механическую характеристику двигателя с независимым возбуждением (прямая *1*).

Важнейшим достоинством двигателя с независимым возбуждением является возможность плавного регулирования скорости в широких пределах и без больших затрат мощности. Такое регулирование осуществляется изменением его тока возбуждения или изменением напряжения на зажимах якоря, например с помощью отдельного управляемого генератора (система Г—Д) или с помощью управляемого тиристорного преобразователя (система ТП—Д). При уменьшении тока возбуждения (ослаблении поля) скорость холостого хода двигателя n_0 увеличивается; изменением напряжения двигателя скорость n обычно уменьшают по сравнению с основной.

Учитывая рассмотренные свойства двигателя с независимым возбуждением, его применяют в тех случаях, когда желательно иметь стабильную скорость механизма при разных нагрузках и в особенности когда требуются широкие пределы регулирования скоростей.

Схема включения двигателя с последовательным возбуждением представлена на рис. 2,*б*.

Обмотка возбуждения *ОВ* такого двигателя изготовляется из толстого провода или шинки с малым числом витков, так как рассчитывается на включение последовательно с якорем двигателя; ток возбуждения при этом равен току якоря. Поэтому при уменьшении нагрузки на валу происходит уменьшение потока двигателя Ф, а скорость холостого хода двигателя n_0 в соответствии с (5) увеличивается обратно пропорционально потоку.

Поэтому скорость вращения двигателей с последовательным возбуждением сильно зависит от нагрузки на валу (кривая *2* на рис. 3). При малых нагрузках скорость велика, а при увеличении нагрузки она снижается. Работа такого двигателя вхолостую недопустима, так как при этом его скорость увеличивается до значений, при которых возможны механические повреждения якоря (двигатель «идет вразнос»). Другой важной особенностью двигателя с последовательным возбуждением является его способность выдерживать относительно бо́льшие перегрузки, чем двигатель с независимым возбуждением.

Указанные особенности двигателя с последовательным возбуждением определяют его широкое применение

на транспорте (трамваи, троллейбусы, электровозы), на подъемных механизмах наиболее ответственных кранов и в некоторых других случаях. Увеличение скорости вращения двигателя при малых нагрузках там, где это допустимо, является фактором, увеличивающим производительность механизма.

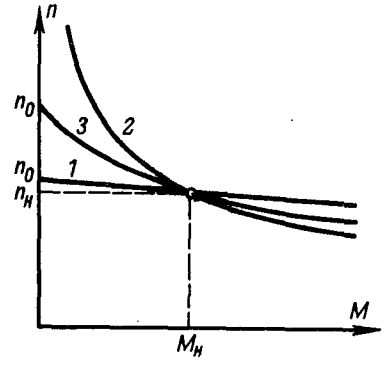


Рис. 3. Механические характеристики двигателей постоянного тока.

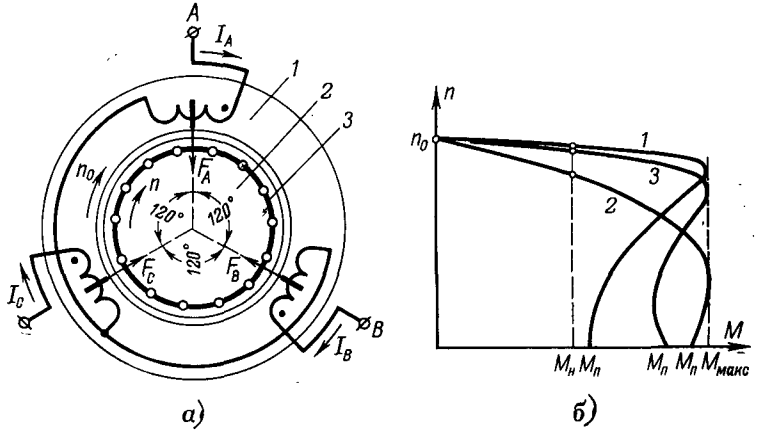
На рис. 2,*в* приведена схема включения двигателя со смешанным возбуждением (компаундного). Такие двигатели имеют две обмотки на главных полюсах: обмотку независимого возбуждения *НОВ* и последовательного возбуждения *ПОВ*, намагничивающая сила (н. с.) которой действует согласно с н. с. обмотки *НОВ*. Поток двигателя Ф и в этом случае зависит от нагрузки на валу, однако в меньшей степени, чем у двигателя с последовательным возбуждением. Поэтому двигатели смешанного возбуждения занимают по своим электромеханическим свойствам промежуточное положение между первыми двумя видами двигателей постоянного тока (кривая *3* на рис. 3).

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.

Конструктивная схема трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором приведена на рис. 4,*а*. Шихтованный статор машины *1* имеет равномерно расположенные по внутренней расточке пазы, в которые уложены три фазы обмотки. Оси обмоток фаз

пространственно сдвинуты на 120° относительно друг друга. При включении обмотки статора в трехфазную сеть переменного тока в фазах протекают переменные токи I_A, I_B, I_C, которые создают переменные н. с. F_A, F_B и F_C, изменяющиеся во времени по синусоидальным законам со сдвигом во времени на 1/3 периода перемен-



а) б)

Рис. 4. Конструктивная схема (*а*); механические характеристики (*б*) асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

ного тока. Вследствие сдвига по времени максимумы н. с. фаз наступают поочередно в последовательности — фаза *A*, фаза *B*, фаза *C*, что приводит к вращению результирующего магнитного поля машины со скоростью

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}, \qquad (6)$$

где f_1 — частота сети переменного тока, Гц; p — число пар полюсов.

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, $f_1 = 50$ Гц:

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1\,000 \text{ об/мин}.$$

Так как число пар полюсов может выражаться только числами натурального ряда $p = 1, 2, 3, 4$ и т. д., то при промышленной частоте синхронная скорость двигателя может иметь лишь вполне определенные значения: 3 000, 1 500, 1 000, 750 об/мин соответственно.

Ротор двигателя *2* на рис. 4,*а* имеет короткозамкнутую обмотку в виде беличьей клетки *3* и находится во вращающемся со скоростью n_0 магнитном поле, создаваемом обмоткой статора. Вращающееся магнитное поле, пересекая проводники ротора, наводит в них э. д. с., под действием которой в замкнутой накоротко обмотке ротора протекают токи. В результате взаимодействия этих токов с магнитным полем машины возникает момент *M*, увлекающий ротор в направлении вращения поля статора.

Электродвижущая сила роторной обмотки зависит от относительной скорости пересечения полем проводников ротора, которую принято называть скольжением асинхронной машины. Скольжение, %, определяется по формуле

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} 100, \qquad (7)$$

где n — скорость вращения ротора.

Электромеханические свойства асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором можно установить, рассматривая его механическую характеристику (кривая *1* на рис. 4,*б*). При вращении ротора с синхронной скоростью $n = n_0$, скольжение $s = 0$, соответственно равны нулю э. д. с. ротора и развиваемый машиной момент *M*. При увеличении нагрузки на валу ротор начинает отставать от поля, скольжение возрастает, что вызывает рост момента двигателя *M* до значения, определяемого нагрузкой на валу. При этом скорость несколько уменьшается, оставаясь близкой скорости n_0. В пределах рабочих нагрузок характеристика асинхронного двигателя подобна характеристике двигателя с независимым возбуждением (кривая *1* на рис. 3).

Однако при дальнейшем росте нагрузки механическая характеристика асинхронного двигателя все больше отклоняется от прямой, скорость уменьшается с возрастанием *M* все быстрее. При увеличении нагрузки на валу до значений, превышающих критический момент машины $M_{макс}$, дальнейшее снижение скорости вызывает

не возрастание момента двигателя, а его уменьшение и двигатель быстро останавливается. Это явление иногда называют «опрокидыванием» двигателя, однако этот термин неудачен и им пользоваться не следует.

Важным параметром асинхронного короткозамкнутого двигателя является пусковой момент $M_п$, который он развивает при $n=0$, т. е. в начале пуска. У двигателей с короткозамкнутым ротором нормального исполнения пусковой момент намного меньше, чем критический момент $M_{макс}$. Это обстоятельство может осложнять пуск двигателей под нагрузкой, поэтому конструкторы принимают меры для увеличения пускового момента. С этой целью, например, можно увеличить сопротивление короткозамкнутой роторной обмотки, применив для ее изготовления сплав с большим удельным сопротивлением. Характеристика двигателя при увеличении сопротивления роторной клетки примет вид кривой *2* на рис. 4,*б*. Рассматривая ее, можно установить, что при изменении сопротивления ротора критический момент не изменяется, пусковой момент увеличивается, но одновременно уменьшается скорость вращения двигателя в рабочей зоне характеристики и уменьшается к. п. д. двигателя. Однако в ряде случаев такой способ увеличения пускового момента используется. Двигатели, изготовленные с повышенным сопротивлением роторной клетки, называются двигателями с повышенным скольжением.

Другим способом увеличения пускового момента является изготовление ротора с глубокими пазами или с двойной беличьей клеткой. В этом случае сопротивление роторной обмотки переменно — при малых скоростях больше, чем в рабочей зоне. Характеристика двигателя с двойной беличьей клеткой представлена на рис. 4,*б* (кривая *3*).

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют на роторе трехфазную обмотку, аналогичную статорной. Зажимы обмотки ротора выведены на контактные кольца, поэтому в цепь ротора такого двигателя можно включать добавочные пусковые и регулировочные сопротивления. Схема включения двигателя с фазным ротором показана на рис. 5,*а*. На рис. 5,*б* показаны механические $n=f(M)$ и электромеханические $n=f(I_1)$ характеристики, причем I_1 — ток фазы статорной обмотки. Механическая характеристика *1* соответствует работе

двигателя с замкнутыми накоротко кольцами. Сравнивая ее с кривой *1* на рис. 4,*б*, можно убедиться, что они аналогичны по форме, но пусковой момент двигателя с фазным ротором при $n=0$ обычно меньше, чем у короткозамкнутого.

Кривая *1′* представляет соответствующую механической характеристике *1* зависимость $n=f(I_1)$. При включении добавочного сопротивления $R_{д2}$ в цепь ротора пусковой момент двигателя увеличивается, а пусковой

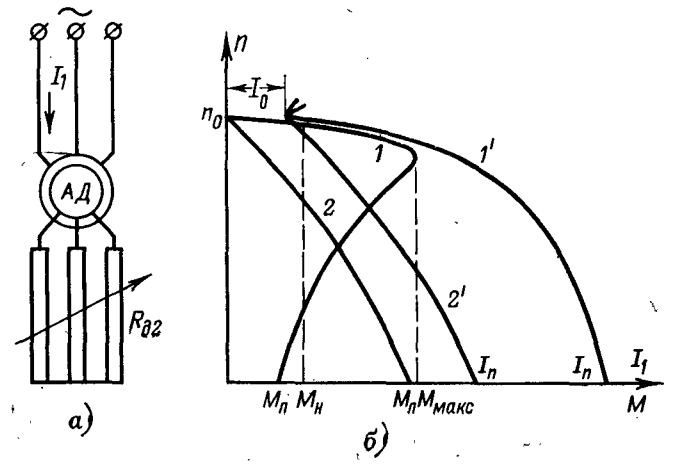


Рис. 5. Схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором (*а*); его характеристики (*б*).

ток $I_п$ — уменьшается (кривые *2* и *2′* на рис. 5,*б*). Поэтому, вводя пусковой реостат в цепь ротора, можно получить достаточный пусковой момент при небольшом токе статора, а затем постепенно по мере разгона двигателя вывести его, замкнуть кольца накоротко и работать со скоростью, мало отличающейся от синхронной. Это важное преимущество двигателя с фазным ротором перед короткозамкнутым. При эксплуатации асинхронных двигателей необходимо учитывать, что при снижении напряжения сети пусковой и критический моменты снижаются пропорционально квадрату напряжения сети.

Благодаря простоте и надежности асинхронные двигатели получили на практике наиболее широкое применение, хотя их возможности 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). Асинхронные двигатели с фазным ротором успешно применяются для механизмов, работающих с частыми пусками и остановками и требующих регулирования скорости введением сопротивлений в цепь ротора.

Конструктивная схема синхронного двигателя представлена на рис. 6,*а*. Статор *1* не имеет отличий от рассмотренного выше асинхронного двигателя. Его трехфазная обмотка создает вращающееся магнитное поле, которое взаимодействует с полем ротора *2*, создаваемым

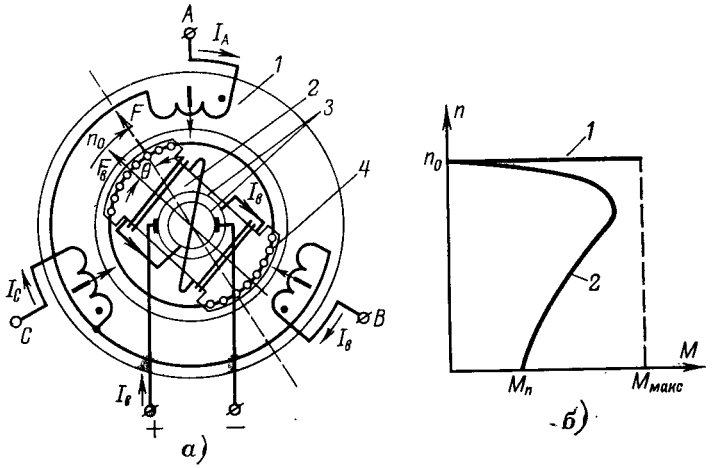


Рис. 6. Конструктивная схема (*а*); характеристики (*б*) синхронного двигателя.

обмоткой возбуждения. Через контактные кольца *3* обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока. Постоянный ток $I_в$ превращает ротор в постоянный магнит, который притягивается к соответствующему полюсу вращающегося магнитного поля и вращается с ним синхронно со скоростью n_0. При увеличении нагрузки на валу ось ротора отклоняется на

угол θ от оси вращающегося поля статора, силы притяжения, возрастая, вызывают увеличение момента двигателя *M*, но скорость остается постоянной. При достижении некоторого предела нагрузки ротор отрывается от вращающегося поля — двигатель выпадает из синхронизма. Поэтому механическая характеристика синхронного двигателя имеет вид, представленный на рис. 6,*б* прямой *1*.

В процессе пуска синхронный двигатель работает как асинхронный. С этой целью на его роторе размещается короткозамкнутая пусковая обмотка *4*. Пусковая механическая характеристика двигателя показана на рис. 6,*б* (кривая *2*).

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 редко. В связи с ограниченным объемом книги особенности выбора синхронных двигателей в ней не рассматриваются.

Приведенный краткий обзор охватывает основные разновидности электрических двигателей, наиболее широко применяющихся на промышленных предприятиях. Выбор электродвигателей по роду тока является сложной задачей, которая, как отмечалось, решается в процессе проектирования электропривода. В условиях же эксплуатации выбор двигателя, как правило, связан с заменой двигателя, установленного на механизме. Поэтому в дальнейшем считаются 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 на электродвигатели воздействует разная окружающая среда. В сухих помещениях с атмосферой, не загрязненной пылью, едкими парами или газами, обмотки двигателей и коллекторы машин постоянного тока не подвергаются никаким вредным воздействиям. В помещениях с повышенной влажностью, запыленностью и в особенности при наличии едких паров или газов обмотки двигателей и их коллекторы необходимо защищать от вредного воз-

действия 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 изготовляют 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.

Это 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. Кроме того, при выборе двигателей следует обращать внимание на их исполнение по способу монтажа (горизонтальное, 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.

2. 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. Потребляемую мощность (кВт) можно подсчитать по формулам:

для двигателя постоянного тока

$$P_1 = 0{,}001\, U_н I_я, \qquad (8)$$

где $U_н$ — напряжение на зажимах двигателя, В; $I_я$ — ток, потребляемый двигателем из сети, А;

для асинхронного двигателя

$$P_1 = 0{,}001 \sqrt{3} U_{1л} I_{1л} \cos\varphi, \qquad (9)$$

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 сопровождается потерями энергии в двигателе. Мощность потерь (кВт) определяется по формуле $\Delta P = P_1 - P_2$.

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

Рассмотрим энергетическую диаграмму асинхронного двигателя, приведенную на рис. 7,*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 $\Delta P_{ст}$, механических потерь $\Delta P_{мех}$, связанных с трением в подшипниках и наличием вентилятора на валу двигателя, а также потерь в сопротивлениях обмоток статора $\Delta P_{м1}$ и ротора $\Delta P_{м2}$.

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 мало зависят от нагрузки на валу двигателя, поэтому их принято считать постоянными. Потери в меди обмотки зависят

от квадрата тока I, протекающего по обмотке с сопротивлением R:

$$\Delta P_м = I^2 R.$$

При увеличении нагрузки на валу двигателя увеличивается полезная мощность P_2, а значит, и потребляемая мощность P_1. Это влечет за собой в соответствии

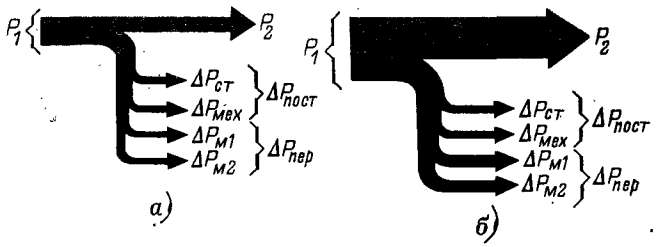


Рис. 7. Энергетические диаграммы асинхронного двигателя.

с формулами (8) и (9) увеличение тока, проходящего по обмоткам двигателя, а следовательно, и потерь в меди двигателя $\Delta P_{м1}$ и $\Delta P_{м2}$. Поэтому потери в меди принято называть переменными потерями.

Энергетическая диаграмма, соответствующая увеличенной в сравнении с рис. 7,*а* нагрузке, приведена на рис. 7,*б*. На основании этой диаграммы можно сделать важный вывод, что суммарная мощность потерь в двигателе ΔP увеличивается при возрастании нагрузки на его валу 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 $t^0_{о.с}$.

Выделяющееся в двигателе в течение каждой секунды количество тепла $0{,}24\,\Delta P$ (ккал/с) вызывает увеличение его температуры. Очевидно, чем больше мощность потерь ΔP, 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 $t^0_{о.с}$, чем температура двигателя t^0. Чем больше разница между этими температурами, тем

больше количество тепла (ккал/с), отдаваемое в окружающую среду в течение каждой секунды:

$$Q_{о.с} = A(t^0 - t^0_{о.с}), \qquad (10)$$

где A — теплоотдача двигателя, ккал/град·с. Теплоотдача двигателя равна количеству тепла, отдаваемого двигателем в окружающую среду в течение 1 с при разнице температур t^0 и $t^0_{о.с}$, равной 1 °С.

Из формулы (10) следует, что процесс нагревания двигателя сопровождается непрерывным увеличением количества тепла, отдаваемого в окружающую среду. В связи с этим скорость нарастания температуры двигателя по мере его нагрева постепенно уменьшается. При некоторой температуре двигателя $t^0_{уст}$ все выделяющееся в нем тепло будет полностью отдаваться в окружающую среду. Приравнивая количество тепла, выделяющееся в двигателе в течение 1 с, количеству тепла, отдаваемому двигателем за то же время в соответствии с формулой (10), можно записать:

$$0{,}24\,\Delta P = A(t^0_{уст} - t^0_{о.с}).$$

При этом наступит тепловое равновесие и дальнейший рост температуры двигателя прекратится. Из последнего равенства легко определить установившуюся температуру двигателя

$$t_{уст} = \frac{0{,}24\,\Delta P}{A} + t^0_{о.с}. \qquad (11)$$

Таким образом, нагрузка на валу двигателя определяет установившуюся температуру двигателя при данной температуре окружающей среды. Из формулы (11) 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. 8. графически изображена зависимость температуры двигателя от времени t при работе с небольшой нагрузкой на валу (кривая 1). При увеличении нагрузки увеличивается мощность потерь ΔP и возрастает установившаяся температура двигателя $t^0_{уст\,1}$ (кривая *2*). Увеличение температуры окружающей среды $t^0_{о.с}$ при той же повышенной нагрузке вызывает дальнейшее увеличение температуры двигателя до значения $t^0_{уст\,2}$ (кривая *3*).

Указанная на рис. 8 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.

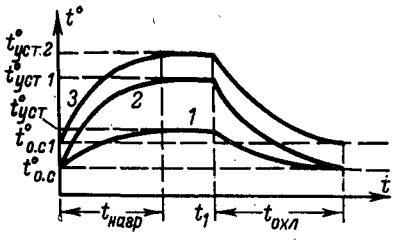


Рис. 8. Зависимость температуры двигателя $t°$ от времени t при нагревании и охлаждении двигателя.

Если в момент t_1 (рис. 8) 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. 8. Через время $t_{охл}$ двигатель охладится до температуры окружающей среды $t^0_{о.с}$. Это время обычно больше, чем время нагревания $t_{нагр}$, так как большинство двигателей имеет вентилятор, расположенный непосредственно на их валу, и условия охлаждения при остановке двигателя сильно ухудшаются. Для двигателей с независимой вентиляцией $t_{нагр} \approx t_{охл}$, так как охлаждающий их вентилятор приводится во вращение вспомогательным двигателем небольшой мощности, который продолжает работать и после остановки основного двигателя.

3. НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Основой выбора конкретного двигателя являются его паспортные (номинальные) данные, указываемые заводом-изготовителем на щитке машины. Кроме того, ряд важных параметров двигателей можно найти в справочной литературе (каталогах). Рассмотрим физический смысл и практическое значение этих величин. Соответствие их условиям работы двигателя на производственном механизме определяет правильность его выбора.

На щитке машины указывается номинальное напряжение, на которое она рассчитана. Это напряжение должно 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 △/Y, то при напряжении между фазами питающей линии 220 В обмотка статора должна включаться в треугольник (рис. 9,*а*), а при 380 В — в звезду (рис. 9,*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.

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.

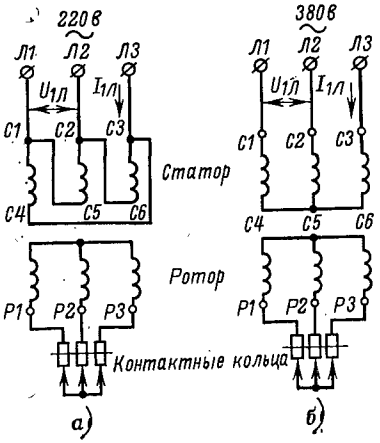


Рис. 9. Соединение статорной обмотки в треугольник и звезду.

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 в соответствии с (6) определяет скорость вращения магнитного поля машины (синхронную скорость вращения) n_0. Номинальная скорость вращения асинхронного двигателя, указанная на щитке,

всегда несколько меньше синхронной, так как при увеличении нагрузки скорость вращения ротора уменьшается (рис. 4,*б* и 5,*б*). Номинальной скорости $n_н$ соответствует номинальное скольжение $s_н$. Для большинства двигателей $s_н = 2 \div 5\%$, причем меньшие значения соответствуют более мощным двигателям. У так называемых двигателей с повышенным скольжением $s_н = 6 \div 12\%$.

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.

Остальные данные, указываемые на щитке двигателя (номинальные мощность, ток и режим работы), характеризуют нагрузку двигателя, на которую он рассчитан по условиям нагревания. Правильное понимание смысла этих номинальных величин имеет при выборе и эксплуатации двигателей важнейшее значение, поэтому остановимся на их рассмотрении подробнее.

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 его службы.

Максимально допустимая температура двигателя в зависимости от вида изоляции обычно лежит в пределах 105—125 °С. Тем самым ограничивается и максимально допустимая нагрузка на валу по условиям нагрева двигателя.

Приведенные на щитке двигателя номинальные значения мощности $P_н$, тока $I_н$ и скорости вращения $n_н$ соответствуют номинальной нагрузке на валу, при которой двигатель, работая в номинальном режиме, при температуре окружающей среды 35 °С * 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 (11) температура двигателя $t^0_{уст}$ зависит не только от нагрузки на валу, но и от температуры окружающей среды $t^0_{о.с}$. Из определения следует, что двигатель можно нагружать указанной в паспорте номинальной нагрузкой, если температура окружающей среды не превосходит 35 °С. 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, включенный 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. 10,*а*). Двигатель успевает нагреться до установившейся допустимой температуры $t_{уст} = t_{доп}$, и дальнейший рост температуры прекращается.

Такой режим работы называется длительным. У двигателей, предназначенных для длительного режима работы, номинальный режим на щитке обозначается словом «*длит*».

---

* Это значение температуры окружающей среды соответствует ГОСТ 183-55. Новые серии двигателей, в частности серии А2 и АО2, в соответствии с ГОСТ 183-66 рассчитаны для работы при температуре окружающей среды 40 °С.

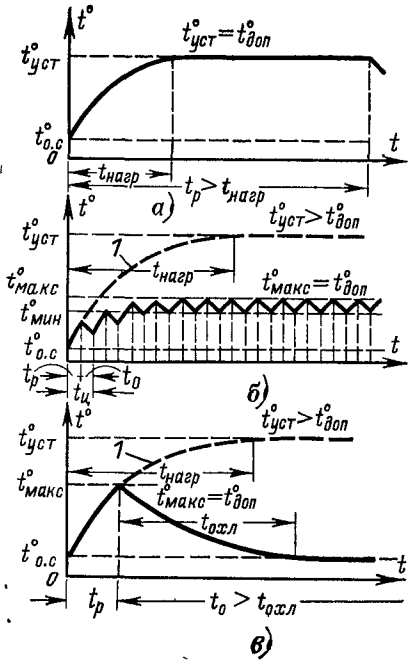


Рис 10. Зависимость температуры двигателя $t°$ от времени t при работе с постоянной нагрузкой на валу в длительном режиме (*а*), в повторно-кратковременном режиме (*б*), в кратковременном режиме (*в*).

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 $t_{нагр}$, за которое двигатель достигает установившейся температуры. Поэтому за время, в течение которого двигатель включен, его температура не успевает сильно возрасти. Во время паузы двигатель охлаждается и его температура падает, стремясь сравняться с температурой окружающей среды, но за короткий промежуток паузы она 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 $t^0=f(t)$, приведенной на рис. 10,*б*. На этом рисунке периоды работы двигателя, когда его температура повышается, обозначены $t_р$, 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 $t^0_{макс}$ и $t^0_{мин}$.

Этот режим подобен режиму работы с установившейся температурой $t^0_{уст}$ на графике рис. 10, *а*, так как дальнейший рост температуры двигателя прекращается. Такой режим работы двигателя называется повторно-кратковременным.

Двигатели повторно-кратковременного режима работы рассчитываются на цикл работы, приведенный на рис. 11. Согласно этому графику двигатель включается 1 раз за цикл и работает в течение 25% времени цикла с постоянной нагрузкой. Время цикла не не должно превышать 10 мин.

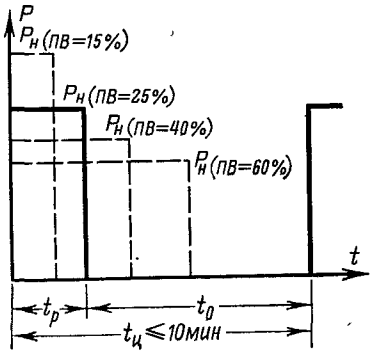


Рис. 11. Номинальные графики нагрузки двигателей повторно-кратковременного режима.

Основной характеристикой повторно-кратковременного режима работы является относительная продолжительность включения (рис. 11), которая (в процентах) определяется из формулы

$$ПВ = \frac{t_р}{t_р + t_0} 100 = \frac{t_р}{t_ц} 100. \qquad (12)$$

Следовательно, основным номинальным режимом двигателей повторно-кратковременного режима является режим с $ПВ=25\%$. Кроме основного номинального режима ($ПВ=25\%$) существуют номинальные режимы $ПВ=15\%$, $ПВ=40\%$ и $ПВ=60\%$, показанные на том же графике пунктирными линиями. 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 $ПВ=25\%$.

Рассмотрим условия 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 вентиля, а 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 двигатель не успеет нагреться до установившейся температуры, а продолжительности пауз достаточны для его полного охлаждения до температуры окружающей среды (см. рис. 10,*в*).

Такой режим работы двигателя называется кратковременным. Кратковременный режим работы характеризуется временем работы $t_р$ (см. рис. 10,*в*). Существуют следующие стандартные номинальные режимы: $t_р = 15$, 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).

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 бóльшие нагрузки, учитывая, что двигатель не достигнет установившейся температуры $t^0_{уст}$ и нагрев двигателя будет не выше допустимой температуры $t^0_{макс.доп}$.

Обратим внимание на то, что если при очередном включении в момент времени t_1 двигатель, рассчитанный на повторно-кратковременный режим, оставить включенным длительно с номинальной нагрузкой, через время $t_{нагр}$ его температура достигнет установившегося значения $t^0_{уст}$, большего чем $t^0_{макс.доп}$ (см. пунктирную кривую *1* на рис. 10,*б*), и двигатель может сгореть. Аналогичное явление будет и при продолжительной работе двигателя, рассчитанного на кратковременный режим (см. пунктирную кривую *1* на рис. 10,*в*).

Таким образом, номинальные значения мощности,

тока двигателя и соответствующие им значения номинальной скорости вращения указываются заводом-изготовителем на щитке двигателя для вполне определенного номинального режима работы и действительны только для этого режима. Указывая эти величины, завод определяет нагрузку двигателя, при которой он, работая в номинальном режиме, имеет допустимую температуру всех частей, если напряжение питания, частота сети переменного тока и другие рассмотренные выше факторы точно соответствуют номинальным значениям.

Кроме рассмотренных номинальных величин на щитках двигателей переменного тока обычно указываются значения номинального к. п. д. и номинального коэффициента мощности ($\cos\varphi$) двигателя, соответствующие номинальной нагрузке на его валу.

Коэффициент полезного действия двигателя в общем случае определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}. \qquad (13)$$

Номинальный к. п. д. соответствует номинальной мощности на валу $P_{2н}$ и определяет номинальные потери мощности в двигателе $\Delta P_н$. Для двигателей постоянного тока он не указывается потому, что его значение легко рассчитать по другим паспортным данным двигателя

$$\eta_н = \frac{P_н}{U_н I_н}. \qquad (14)$$

Коэффициент мощности является важной энергетической характеристикой двигателей переменного тока. Формально его можно определить с помощью соотношения (9)

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{0{,}001\sqrt{3}\,U_{1л} I_{1л}} = \frac{P_1}{P_{каж}}, \qquad (15)$$

где $P_{каж}$ — кажущаяся мощность, потребляемая из сети переменного тока.

Если $\cos\varphi = 1$, то в соответствии с (15) величина потребляемой из сети мощности $P_1 = P_2 + \Delta P$ равна кажущейся мощности $P_{каж}$. Если $\cos\varphi$ меньше единицы, то для получения той же потребляемой мощности P_1 потребуется большая кажущаяся мощность

$$P_{каж} = P_1/\cos\varphi,$$

а это при неизменном напряжении сети $U_{1л}$ равносильно увеличению потребляемого тока $I_{1л}$. Физически уменьшение $\cos\varphi$ свидетельствует об увеличении так называемой реактивной мощности, которая связана с существованием переменных магнитных полей. Так, для создания вращающегося магнитного поля асинхронного двигателя из сети потребляется намагничивающий ток I_0, величина которого составляет 30—50% номинального тока статорной обмотки (см. рис. 5,*б*). Этот ток не совершает работы, ибо во время нарастания потока запасается энергия магнитного поля и энергия поступает от сети в двигатель, а во время уменьшения магнитного потока до нуля вся запасенная в магнитном поле энергия успевает возвратиться в сеть. Поэтому мощность намагничивающего тока является реактивной, обусловленной непрерывным процессом обмена энергией между сетью и двигателем.

При уменьшении $\cos\varphi$ для совершения той же полезной работы двигатель должен потреблять больший ток. Увеличенный ток, протекая по проводам сети и обмоткам трансформаторов, дополнительно загружает их, увеличивая потери в сети и ухудшая использование источников питания. Поэтому уменьшение потребления реактивной мощности за счет повышения $\cos\varphi$ токоприемников является одной из важных проблем экономичной эксплуатации электрооборудования промышленных предприятий.

Были рассмотрены физический смысл и значение важнейших параметров двигателей, являющихся их паспортными данными, выбитыми на щитке. Ряд величин, которые необходимы в различных случаях выбора двигателей, указываются в каталогах и приведены в справочных данных серийных двигателей, включенных в приложения в данной книге. Каждая из них будет рассмотрена в дальнейшем по мере необходимости.

4. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ СЕРИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

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

Основной серией трехфазных асинхронных двигателей в настоящее время является серия А2. Основные

исполнения двигателей этой серии охватывают диапазон мощностей от 0,6 до 125 кВт и имеют синхронные скорости вращения 3 000, 1 500, 1 000 и 750 об/мин. В указанном диапазоне мощностей двигатели выпускаются на напряжения сети 127/220; 220/380 и 500 В и рассчитаны на промышленную частоту переменного тока $f=50$ Гц.

По способу защиты от воздействия окружающей среды двигатели единой серии выпускаются в защищенном (А2) и закрытом обдуваемом исполнении (АО2). Небольшие двигатели в закрытом исполнении могут выпускаться со станиной и подшипниковыми щитами из алюминиевого сплава. В этом исполнении в обозначение добавляется буква Л (АОЛ2).

По способу монтажа двигатели единой серии имеют три основных исполнения: на лапах с двумя подшипниковыми щитами; на лапах с фланцем на подшипниковом щите со стороны свободного конца вала; без лап с фланцем на подшипниковом щите со стороны свободного конца вала. Эти исполнения позволяют охватить все основные варианты монтажа двигателя, встречающиеся на практике.

Наряду с основным исполнением имеется ряд электрических модификаций двигателей единой серии. Для механизмов с тяжелыми условиями пуска (компрессоры, конвейеры, дробилки, ленточные пилы) выпускаются двигатели с двойной беличьей клеткой, обладающие повышенным пусковым моментом (АОП2). Для текстильной промышленности выпускаются двигатели с повышенными энергетическими показателями (АОТ2). Для встраивания в станки и другие механизмы двигатели единой серии выпускаются без станины, подшипниковых щитов и вала (АВ2). Двигатели единой серии с фазным ротором в защищенном исполнении обозначаются АК2, а в закрытом обдуваемом исполнении — АОК2.

Особое место в единой серии занимают двигатели с короткозамкнутым ротором, имеющие за счет повышенного сопротивления роторной клетки повышенное скольжение (АОС2). Следует иметь в виду, что номинальные данные этих двигателей соответствуют повторно-кратковременному режиму работы с $ПВ_н=25\%$. Мощность, которую эти двигатели способны развивать в длительном режиме ($ПВ=100\%$), указывается в каталогах.

Для электроприводов, требующих ступенчатого регулирования скорости, двигатели единой серии выпускаются в многоскоростном исполнении. Число выходных концов у двухскоростных двигателей 6, у трехскоростных 9, у четырехскоростных 12.

Пример обозначения двигателя единой серии: АО2 61-8/6/4 — асинхронный закрытый обдуваемый двигатель с короткозамкнутым ротором, шестого габарита, первой длины, с трехскоростным исполнением на 750/1 000/1 500 синхронных оборотов в минуту.

Исчерпывающие технические данные двигателей единой серии А2 (АО2) приведены в каталоге-справочнике [Л. 3]. В настоящее время промышленность осваивает выпуск двигателей новой более совершенной серии А4(АО4).

На промышленных предприятиях в настоящее время находится в эксплуатации большое число двигателей единой серии А (АО), которые уже сняты с производства. Двигатели этой серии имеют в основном подобные электрические модификации и аналогичное обозначение, в котором отсутствует цифра 2 (например, АО 61-8/6/4). Ряд технических данных двигателей этой серии, которые требуются при их выборе, приведены в приложении 1.

Из двигателей постоянного тока длительного режима работы наиболее распространенными являются серии ПН и П. Двигатели серии ПН выпускались в защищенном и закрытом исполнениях в диапазоне мощностей от 0,25 до 200 кВт при напряжениях 110, 220 и 440 В и скоростях вращения от 550 до 2 870 об/мин. Двигатели серии ПН являются двигателями со смешанным возбуждением, но имеют характеристики, близкие машинам с независимым возбуждением. В настоящее время серия ПН снята с производства и заменена единой серией П машин постоянного тока.

Двигатели единой серии П выпускаются в 26 габаритах и охватывают широкий диапазон мощностей — от 0,3 до 5 400 кВт. Мощные машины этой серии, как правило, специализированы по назначению. Общепромышленными являются двигатели с 1-го по 11-й габариты, имеющие мощность от 0,3 до 200 кВт при скорости вращения 1 500 об/мин. В этих габаритах двигатели выпускаются на напряжения 110, 220 и 440 В при скоростях вращения 600, 750, 1 000, 1 500 и 3 000 об/мин. Двигатели единой серии П имеют аналогично серии ПН независимое возбуждение со слабой дополнительной последовательной обмоткой.

По способу защиты от воздействия окружающей среды двигатели мощностью до 200 кВт выпускаются в защищенном и закрытом исполнениях. Закрытые двигатели с естественным охлаждением имеют буквенное обозначение ПБ, с наружным обдувом — ПО и с дополнительным внешним воздухоохладителем (радиатором) — ПР.

Пример обозначения двигателя единой серии машин постоянного тока: ПО-102 — двигатель в закрытом обдуваемом исполнении 10-го габарита с сердечником второй длины.

Полные технические данные двигателей постоянного тока единой серии П приведены в [Л. 4].

Для повторно-кратковременного режима работы отечественной электропромышленностью выпускаются крановые и металлургические двигатели серий МТ, МТВ, МТМ (асинхронные с фазным ротором), МТК, МТКВ, МТКМ (асинхронные с короткозамкнутым ротором) и ДП (постоянного тока).

Двигатели указанных серий выпускаются, в основном, в закрытом обдуваемом исполнении, ряд габаритов машин выпускается в защищенном исполнении с независимой вентиляцией, т. е. имеют вынесенный на корпус двигателя вентилятор, который приводится во вращение с помощью небольшого асинхронного двигателя независимо от режима работы основного двигателя. Они рассчитаны для работы как в помещениях, так и на открытом воздухе. Однако завод-изготовитель рекомендует при установке двигателей серии ДП на открытом воздухе защищать их навесом от атмосферных осадков.

По способу монтажа краново-металлургические двигатели исполняются главным образом на лапах с горизонтальным валом, а в ряде случаев имеют исполнение фланцевое на лапах либо с вертикальным валом.

Двигатели серий МТ, МТВ, МТК, МТКВ, МТМ и МТКМ изготовляются для частоты 50 Гц и напряжений 220/380 и 500 В и имеют синхронные скорости вращения 1 000, 750 и 600 об/мин. Основным номинальным режимом крановых двигателей является повторно-кратковременный режим с ПВ=25%, а для металлургических — ПВ=40%. Кроме того, в каталогах для всех перечисленных серий указываются номинальные данные для режи-

мов работы с ПВ=15, 25, 40, 60 и 100%. Для двигателей с независимой вентиляцией основным номинальным режимом является длительный режим (ПВ=100%). Технические данные крановых асинхронных двигателей указаны в приложении 2.

Двигатели постоянного тока серии ДП изготовляются в диапазоне мощностей 3—150 кВт на напряжения 220 и 440 В с независимым, смешанным или последовательным возбуждением. Основным номинальным режимом закрытых двигателей является ПВ=25%, а для двигателей с независимой вентиляцией — ПВ=100%. Обмотки независимого возбуждения всех двигателей, независимо от основного режима работы двигателя, рассчитаны на длительный режим работы. Это означает, что при остановках двигателя его обмотку независимого возбуждения можно от сети не отключать.

В эксплуатации полезно иметь в виду, что двигатели серии ДП, рассчитанные на номинальное напряжение 220 В, при независимом возбуждении допускают увеличение скорости в 2 раза путем повышения в 2 раза напряжения на якоре, при условии, что ток возбуждения двигателя при работе остается неизменным, равным его номинальному значению.

Кроме серий МТ, МТК и ДП, в эксплуатации можно встретить крановые и краново-металлургические двигатели серий КТ, КТК (трехфазного переменного тока) и МП, КПД, КПДН и т. п. (постоянного тока), выпуск которых в настоящее время прекращен.

Двигатели кратковременного режима имеют, как правило, специализированное назначение и крупными сериями не выпускаются. Поэтому не будем останавливаться на их описании, но заметим, что допускают работу в кратковременном режиме краново-металлургические двигатели серии ДП. Для этих двигателей в каталогах приводятся их номинальные данные для кратковременного режима работы с $t_р$=60 мин, а также указывается, что для закрытых двигателей с естественным охлаждением мощность в режиме 30 мин составляет около 120% мощности в режиме 60 мин.

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. 12,*а* представлена упрощенная схема привода шпинделя токарного станка. Двигатель вращает шпиндель станка с изделием. В результате взаимодействия изделия с резцом возникает усилие резания F_z,

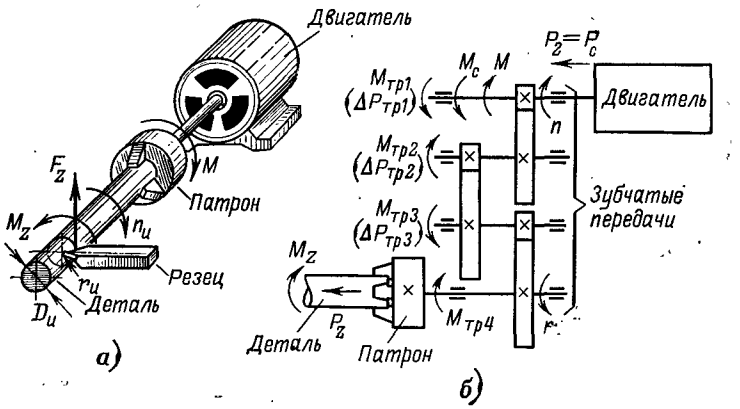


Рис. 12. Упрощенная схема резания токарного станка (*а*); кинематическая схема (*б*).

направленное противоположно направлению вращения двигателя. Это усилие создает на валу двигателя противодействующий момент (Н·м), равный произведению силы F_z на плечо $r_и$:

$$M_z = F_z r_и = F_z \frac{D_и}{2},$$

где F_z — усилие резания, Н; $r_и$ и $D_и$ — 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

$$P_z = \frac{A}{t} = \frac{F_z S}{t} = F_z v, \qquad (16)$$

где v — скорость резания (м/с), численно равная длине стружки, снимаемой резцом за 1 с.

При вращательном движении мощность (кВт) выражают через момент и скорость вращения:

$$P_z = \frac{M_z n_и}{9\,550},$$

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

В рассматриваемом случае мощность на валу двигателя равна полезной мощности резания. Так как $M = M_z$ и $n = n_и$, то мощность (кВт):

$$P_2 = \frac{Mn}{9\,550}, \qquad (17)$$

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 $P_с$ (рис. 12,*б*):

$$P_с = P_z + \Delta P_{тр\,1} + \Delta P_{тр\,2} + \Delta P_{тр\,3} + \Delta P_{тр\,4} = \frac{P_z}{\eta}, \qquad (18)$$

где η — к. п. д. механизма, учитывающий все потери на трение в механизме.

По известной суммарной мощности нагрузки на валу двигателя $P_с$ можно с помощью формулы (17) определить и суммарный момент нагрузки (Н·м) на этом валу:

$$M_с = 9\,550 \frac{P_с}{n}. \qquad (19)$$

Момент, развиваемый двигателем, при этом равен суммарному моменту нагрузки

$$M = M_с.$$

В рассмотренном 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. 13. 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. Таким образом, при работе двигатель всегда развивает момент, численно равный суммарному моменту нагрузки на валу и направленный противоположно ему.

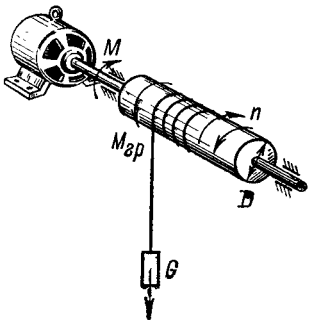


Рис. 13. К определению нагрузки на валу двигателя простейшей подъемной лебедки.

Переходя непосредственно к примерам расчета нагрузок, необходимо заметить, что в данном издании брошюры в соответствии с действующим стандартом все расчеты выполняются в международной системе единиц СИ.

Поскольку сила тяжести (вес, грузоподъемность) в практических расчетах задается в килограммсилах (кгс, система МКГС) или в тониасилах (тс = 1 000 кгс), ниже в примерах эти размерности используются. При этом в соответствии с известным соотношением 1 кВт = 102 кгс·м/с мощность (кВт) удобно вычислять по формуле

$$P = \frac{Gv}{102},$$

где G — сила тяжести, кгс; v — скорость, м/с.

Пример 1. Определить нагрузку на валу двигателя типа АО 51-4 $P_н = 4{,}5$ кВт; $n_н = 1\,440$ об/мин, приводящего во вращение шпиндель токарного станка.

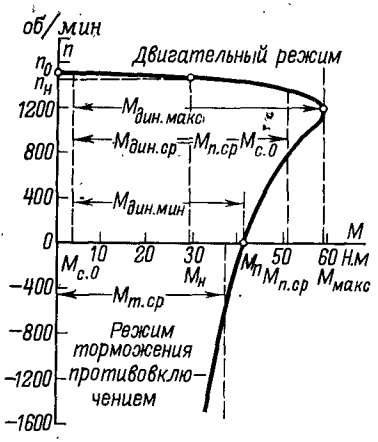


Рис. 14. Механическая характеристика асинхронного двигателя АО 51-4.

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

Мощность на валу при черновой обработке по формуле (18)

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

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

Значения мощностей резания указываются в справочниках и рассчитываются технологами для номинальной скорости вращения $n_н$. Поэтому при определении момента нагрузки на валу двигателя можно не учитывать, что скорость вращения асинхронного двигателя зависит от нагрузки на валу (рис. 14), и принимать ее равной $n_н$.

Момент нагрузки на валу двигателя при черновой обработке по формуле (19)

$$M_{c1}=9{,}550\frac{P_{c1}}{n_н}=9\,550\frac{4{,}22}{1\,440}=28 \text{ Н·м}.$$

То же при чистовой обработке

$$M_{c2}=9\,550\frac{P_{c2}}{n_н}=9\,550\frac{3{,}16}{1\,440}=21 \text{ Н·м}.$$

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

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

Статический момент при холостом ходе

$$M_{c0}=9\,550\frac{P_{c0}}{n_н}=9\,550\frac{0{,}55}{1\,440}=3{,}65 \text{ Н·м}.$$

Пример 2. Определить нагрузки на валу двигателя подъемной лебедки мостового крана, кинематическая схема которой приведена на рис. 15,*а*. Грузоподъемность лебедки $G_н=10$ тс; грузозахватывающее устройство — крюковая подвеска с подъемным электромагнитом М-41 ($G_0=1\,910$ кгс); скорость подъема $v_н=0{,}33$ м/с; к. п. д. лебедки при номинальной нагрузке $\eta_{л.н}=0{,}72$; при подъеме магнита $\eta_л=0{,}55$. Двигатель типа МТ 62-10; $P_н=45$ кВт при ПВ=25%; $n_н=577$ об/мин.

Мощность на валу двигателя при подъеме номинального груза

$$P_{c1}=\frac{G_н v_н}{102\eta_{л.н}}=\frac{10\,000\cdot 0{,}33}{102\cdot 0{,}72}=44{,}8 \text{ кВт}.$$

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

$$P_{c2}=\frac{G_н v_н}{102}\eta_{л.н}=\frac{10\,000\cdot 0{,}33}{102}\cdot 0{,}72=23{,}3 \text{ кВт}.$$

Соответствующие моменты нагрузки на валу двигателя

$$M_{c1}=9\,550\frac{P_{c1}}{n_н}=9\,550\frac{44{,}8}{577}=743 \text{ Н·м};$$

$$M_{c2}=9\,550\frac{P_{c2}}{n_н}=9\,550\frac{23{,}3}{577}=386 \text{ Н·м}.$$

Мощность на валу двигателя при подъеме магнита

$$P'_{c1}=\frac{G_0 v_н}{102\eta_л}=\frac{1\,910\cdot 0{,}33}{102\cdot 0{,}55}=11{,}2 \text{ кВт}.$$

То же при спуске магнита

$$P'_{c2}=\frac{G_0 v_н}{102}\eta_л=\frac{1\,910\cdot 0{,}33}{102}\cdot 0{,}55=3{,}4 \text{ кВт}.$$

Соответствующие моменты нагрузки

$$M'_{c1}=9\,550\frac{11{,}2}{577}=186 \text{ Н·м};$$

$$M'_{c2}=9\,550\frac{3{,}4}{577}=56{,}3 \text{ Н·м}.$$

Все данные для расчетов по формулам (17) — (19) известны из паспорта производственного механизма

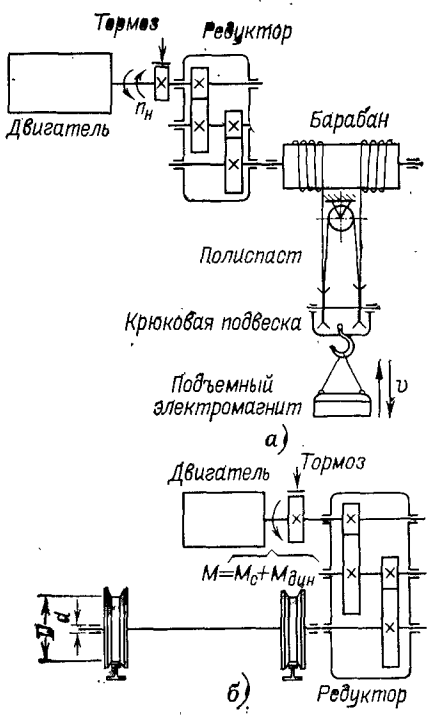


Рис. 15. Кинематическая схема механизма подъема мостового крана (*а*) и механизма передвижения тележки (*б*).

либо из расчетов технологов или механиков. Если отсутствуют данные о к. п. д. передач механизма, его можно подсчитать по формуле

$$\eta_{мех}=\eta_1\eta_2\eta_3\ldots,$$

где η_1, η_2, η_3 ... — к. п. д. отдельных элементов передач.

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

При расчетах следует иметь в виду, что к. п. д. механизма зависит от его загрузки. Обычно в паспорте механизма указывается к. п. д. при номинальной нагрузке на его рабочем органе $P_{р.н}$, 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) $k_з$, меньшем единицы, можно приближенно определить по формуле

$$\eta=\frac{k_з\eta_н}{0{,}6(1-\eta_н)+0{,}6k_з\eta_н+0{,}4k_з}. \qquad (20)$$

Пример 3. Рассчитать нагрузки на валу двигателя механизма передвижения тележки мостового магнитного крана грузоподъемностью $G_н=10$ тс (см. пример 2). Полезный поднимаемый груз, соответствующий номинальной грузоподъемности $G'_н=8\,090$ кгс, вес тележки $G_т=3\,530$ кгс, скорость передвижения $v_н=0{,}61$ м/с, соответствующая ей скорость вращения двигателя $n_н=910$ об/мин; номинальный к. п. д. передач $\eta_н=0{,}82$; диаметр цапфы оси колеса $d=60$ мм; диаметр колеса $D=350$ мм (см. рис. 15,*б*).

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

$$P_с=\frac{k_р(G_{мех}+G_0+G_{гр})(0{,}05d+0{,}08)v}{51D\eta},$$

где $G_{мех}$ — собственный вес тележки или моста с оборудованием, кгс; G_0 — вес захватывающего приспособления (крюковой подвески, магнита, грейфера и т. п.), кгс; $G_{гр}$ — вес полезного груза, кгс; v — скорость передвижения, м/с; η — к. п. д. передач; $k_р$ — коэффициент, учитывающий трение реборд колес о рельсы; для тележки $k_р=1{,}5$, для моста $k_р=2$; d, D — диаметры соответственно цапфы оси и колеса, см.

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

$$P_{с1}=\frac{1{,}5(3\,530+1\,910+8\,090)(0{,}1\cdot3+0{,}08)\cdot0{,}61}{51\cdot35\cdot0{,}82}=3{,}21\ \text{кВт}.$$

Для расчета мощности на валу двигателя при передвижении тележки без груза необходимо знать к. п. д. передач η при уменьшенной загрузке. Коэффициент загрузки для крановых механизмов подсчитывается по формуле

$$k_з=\frac{G_{мех}+G_0+G_{гр}}{G_{мех}+G_н}.$$

При отсутствии груза ($G_{гр}=0$)

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

Подсчитаем к. п. д. при такой нагрузке по формуле (20)

$$\eta=\frac{0{,}4\cdot0{,}82}{0{,}6(1-0{,}82)+0{,}6\cdot0{,}4\cdot0{,}82+0{,}4\cdot0{,}4}=0{,}71.$$

Мощность на валу двигателя при движении без груза

$$P_{с2}=\frac{1{,}5(3\,530+1\,910)(0{,}1\cdot3+0{,}08)\cdot0{,}61}{51\cdot35\cdot0{,}71}=1{,}5\ \text{кВт}.$$

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. 15,*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 3).

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

$$M = M_c + M_{дин} = M_c + \frac{J_\Sigma}{9{,}55} a_{вр}, \qquad (21)$$

где M — момент, развиваемый двигателем, Н·м; M_c — момент на валу двигателя, обусловленный всеми статическими силами в механизме и передачах (статический момент нагрузки), Н·м; $M_{дин}$ — динамический момент, Н·м; J_Σ — суммарный момент инерции на валу двигателя, характеризующий инерционность всех вращательно и поступательно движущихся частей установки, кг·м^2; $a_{вр}$ — ускорение вала двигателя, об/мин/с.

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

В уравнении (21) суммарный момент инерции J_Σ 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 (Дж) в поступательно движущейся массе m [кг] определяется известной формулой

$$W_{к.п} = \frac{mv^2}{2}. \qquad (22)$$

То же во вращающейся массе, обладающей моментом инерции J:

$$W_{к.вр} = \frac{Jn^2}{182}. \qquad (23)$$

Как правило, из всех движущихся частей привода и механизма наибольшим запасом кинетической энергии обладает ротор электродвигателя. Поэтому основную долю в суммарном моменте инерции J_Σ составляет момент инерции двигателя $J_{дв}$. В практических расчетах для определения суммарного момента инерции (кг·м^2) можно пользоваться следующей приближенной формулой:

$$J_\Sigma = (1{,}2 \div 1{,}3) J_{дв} + \frac{182}{n^2} W_{к.мех}, \qquad (24)$$

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

Величину $W_{к.мех}$ в формуле (24) нужно учитывать только в том случае, если рабочий орган механизма обладает большими массами (массивные, вращающиеся с большой скоростью барабаны, значительные поступательно движущиеся массы, маховики). 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^2, для наиболее распространенных двигателей указаны в приложениях к настоящему изданию. В каталогах приводятся значения так называемого махового момента ротора или якоря двигателя $GD^2_{дв}$ (кгс·м^2 или кГ·м^2). Момент инерции двигателя (кг·м^2), необходимый для расчетов по формулам (21) и (24), можно вычислить

при известной величине махового момента двигателя $GD^2_{дв}$ по формуле:

$$J_{дв}=\frac{GD^2_{дв}}{4}.$$

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 $M_{доп}/M_н=2\div2{,}5$, для двигателей с последовательным возбуждением она выше $M_{доп}/M_н=2{,}5\div3{,}0$.

По иным причинам ограничивается перегрузочная способность асинхронного двигателя. Как было показано в § 1, 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 (см. рис. 4,*б*).

Перегрузочная способность асинхронного двигателя определяется по его максимальному моменту с учетом возможного снижения напряжения заводской сети на 10%. Так как момент пропорционален квадрату напряжения, перегрузочную способность следует определять по формуле

$$\frac{M_{доп}}{M_н}=\left(\frac{U}{U_н}\right)^2\frac{M_{макс}}{M_н}=0{,}81\ \frac{M_{макс}}{M_н}. \qquad (25)$$

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

Пример 4. Определить перегрузочную способность асинхронного двигателя типа АО 51-4, а также время его пуска и торможения при холостом ходе станка по данным примера 1.

Из приложения 1 находим:

$$J_{дв}=0{,}05\ кг\cdot м^2;\ \frac{M_{макс}}{M_н}=2;\ \frac{M_п}{M_н}=1{,}4.$$

Перегрузочная способность двигателя по формуле (25)

$$\frac{M_{доп}}{M_н}=0{,}81\frac{M_{макс}}{M_н}=0{,}81\cdot2=1{,}62.$$

Определим номинальный момент двигателя

$$M_н=9\,550\frac{P_н}{n_н}=9\,550\frac{4{,}5}{1\,440}=29{,}8\ Н\cdot м.$$

Пусковой момент двигателя

$$M_п=\left(\frac{M_п}{M_н}\right)M_н=1{,}4\cdot29{,}8=41{,}7\ Н\cdot м.$$

Максимальный момент двигателя

$$M_{макс}=\left(\frac{M_{макс}}{M_н}\right)M_н=2\cdot29{,}8=59{,}6\ Н\cdot м.$$

Определим средний пусковой момент двигателя с короткозамкнутым ротором через пусковой и максимальный моменты (см. рис. 14) по формуле

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

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

$$M_{т.ср}=0{,}9\,M_п=0{,}9\cdot41{,}7=37{,}5\ Н\cdot м.$$

Определим суммарный момент инерции на валу двигателя, пренебрегая запасом кинетической энергии в самом шпинделе и изделии, по формуле (24)

$$J_Σ=1{,}25J_{дв}=1{,}25\cdot0{,}05=0{,}0625\ кг\cdot м^2.$$

Среднее ускорение при пуске (пуск осуществляется при холостом ходе станка; $M_{с\,0}=3{,}65$ Н·м) определяется с помощью формулы (21)

$$a_{вр.п}=9{,}55\frac{M_{п.ср}-M_{со}}{J_{\Sigma}}=9{,}55\frac{47{,}1}{0{,}0625}=7\,200\ \frac{\text{об/мин}}{\text{с}}.$$

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

$$t_{п}=\frac{n_{со}}{a_{вр.п}}=\frac{1\,500}{7\,200}=0{,}208\ \text{с}.$$

Время торможения

$$t_{т}=\frac{n_{со}}{a_{вр.т}}=\frac{J_{\Sigma}}{9{,}55}\frac{n_{со}}{M_{т.ср}+M_{со}}=$$

$$=\frac{0{,}0625}{9{,}55}\cdot\frac{1\,500}{37{,}5+3{,}65}=0{,}238\ \text{с}.$$

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 $t_{п\,0}$ и торможения $t_{т\,0}$ двигателя, не связанного с пронзводственным механизмом. Пользуясь значением $t_{п\,0}$, можно определить время пуска двигателя (с), связанного с производственным механизмом, по формуле

$$t_{п}=t_{п0}\frac{J_{\Sigma}}{J_{дв}}\frac{M_{п.ср}}{M_{п.ср}-M_{с}}. \qquad (26)$$

Аналогично определяется и время торможения (с):

$$t_{т}=t_{т0}\frac{J_{\Sigma}}{J_{дв}}\frac{M_{т.ср}}{M_{т.ср}+M_{с}}. \qquad (27)$$

В нашем случае для двигателя АО 51-4 в приложении 1 указано $t_{п\,0}=0{,}15$ с, $t_{т\,0}=0{,}2$ с. Следовательно, в соответствии с формулами (26) и (27)

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

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

Нетрудно видеть, что, пользуясь табличными значениями $t_{п\,0}$ и $t_{т\,0}$, 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. 14.

Пример 5. Определить по данным примера 2 пусковой момент двигателя, необходимый для получения ускорения груза $a=0{,}4$ м/с^2, при пуске на подъем с номинальным грузом.

Определим суммарный момент инерции на валу двигателя по

формулам (22) и (24) для случая подъема номинального груза

$$J_{\Sigma}=1{,}3J_{дв}+\frac{182}{n_{н}^2}W_{к.п}=1{,}3\cdot4{,}38+$$

$$+\frac{182}{577^2}\cdot\frac{10\,000\cdot0{,}33^2}{2}=6{,}0\ \text{кг}\cdot\text{м}^2.$$

В данном примере заданным является линейное ускорение груза a, с помощью которого по формуле (21) требуется вычислить динамический и полный пусковой моменты двигателя при пуске. В формулу (21) следует подставлять величину ускорения вала двигателя $a_{вр}$, которая может быть определена, исходя из следующих соображений. Известные величины линейной рабочей скорости движения груза $v_{н}$ и линейного ускорения его a позволяют определить время пуска по известной формуле

$$t_{п}=v_{н}/a,\ \text{с}.$$

За время $t_{п}$ скорость вращения двигателя нарастает от 0 до установившейся рабочей скорости $n_{н}$, соответствующей линейной скорости $v_{н}$. Поэтому вращательное ускорение связано с линейным соотношением

$$a_{вр}=\frac{n_{н}}{t_{п}}=\frac{n_{н}}{v_{н}}a. \qquad (28)$$

В рассматриваемом примере

$$a_{вр}=\frac{577}{0{,}33}\cdot0{,}4=698\ \text{об/мин/с}.$$

Динамический момент определяется из формулы (21)

$$M_{дин}=\frac{J_{\Sigma}}{9{,}55}a_{вр}=\frac{6{,}0}{9{,}55}\cdot698=437\ \text{Н}\cdot\text{м}.$$

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

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

Полученное значение пускового момента можно использовать для расчета пускового реостата способом, изложенным в [Л. 2].

6. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ ДЛИТЕЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Изложенные сведения дают представление о важнейших данных, по которым следует подбирать двигатели. 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 защиты от воздействия окружающей среды, номинальные 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 будет перегреваться. Превышение допустимой для двигателя температуры вызовет ускоренное старение его изоляции и сокращение срока службы двигателя. При значительной перегрузке этот срок может сокращаться до нескольких часов, т. е. двигатель попросту сгорит. Это положение известно и учитывается в эксплуатации. Однако к вредным последствиям приводит и значительная недогрузка двигателя.

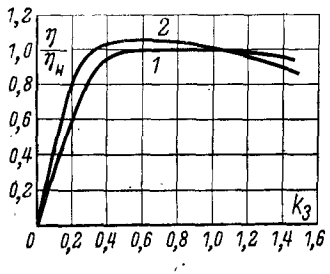


Рис. 16. Кривые $\eta/\eta_н=f(k_з)$ для определения к. п. д. двигателей при ориентировочных расчетах.

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

Обратимся к энергетическим диаграммам, приведенным на рис. 7,*а* и *б*. Эти диаграммы построены для различных нагрузок на валу двигателя. Сравнивая их, можно заключить, что при увеличении нагрузки возрастают только потери в меди двигателя $\Delta P_{м1}$ и $\Delta P_{м2}$, обусловленные током нагрузки, а остальные составляющие потерь (потери в стали, механические и т. п.) остаются практически неизменными.

Это обстоятельство дает основания разделить потери в двигателе на постоянные $\Delta P_{пост}$ и переменные $\Delta P_{пер}$, причем считать, что переменные потери пропорциональны квадрату тока нагрузки

$$\Delta P=\Delta P_{пост}+\Delta P_{пер}=\Delta P_{пост}+k_з^2\,\Delta P_{пер.н}, \qquad (29)$$

где $\Delta P_{пер.н}$ — переменные потери при номинальной нагрузке на валу двигателя; $k_з=I/I_н$ — коэффициент загрузки двигателя по току при данной нагрузке на валу.

Потери в двигателе можно характеризовать величиной его коэффициента полезного действия (к. п. д.)

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}=\frac{P_2}{P_2+\Delta P}. \qquad (30)$$

Из формул (29) и (30) следует, что к. п. д. двигателя зависит от нагрузки на валу. Примерные зависимости к. п. д. двигателей от коэффициента загрузки $k_з=P_2/P_{2н}$ приведены на рис. 16.

В соответствии с кривой *1* при нагрузке на валу, составляющей 20% от номинальной, к. п. д. двигателя $\eta=0{,}6$, т. е. 40% потребляемой из сети мощности будет бесполезно теряться в самом двигателе. При работе вхолостую двигатель, не совершая полезной работы, потребляет из сети мощность потерь $\Delta P_{пост}$. 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.

Таким образом, правильный выбор двигателей по мощности обеспечивает не только высокую надежность работы электроприводов механизмов, но и наиболее экономичное потребление электрической энергии, что имеет 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

$$P_с\leqslant P_н, \qquad (31)$$

где $P_с$ — мощность статической нагрузки на валу; $P_н$ — номинальная мощность двигателя, рассчитанного на длительный режим работы.

При выполнении условия (31) двигатель не будет перегреваться выше допустимой температуры, если температура окружающей среды не превышает 35 °С. Для выбора двигателя нужно знать величину мощности $P_с$. В зависимости от конкретных условий она может быть определена различными путями.

В ряде случаев не представляет затруднений определить мощность нагрузки на валу двигателя расчетным

путем. Так, для центробежных вентиляторов и компрессоров мощность $P_с$ (кВт) можно определить по формуле

$$P_с = \frac{QH}{102\,\eta_в \eta_п}, \qquad (32)$$

где Q — производительность вентилятора, м³/с; H — напор, кгс/м²; $\eta_в$ — к. п. д. вентилятора; $\eta_п$ — к. п. д. передач.

Для насосов

$$P_с = \frac{\gamma QH}{102\,\eta_н \eta_п}, \qquad (33)$$

где Q — производительность насоса, дм³/с; H — напор, м; γ — удельный вес жидкости, кгс/дм³; $\eta_н$ — к. п. д. насоса.

Производительность Q и напор H при работе вентилятора или насоса на определенную магистраль известны из каталогов или по результатам замеров. Величины к. п. д. вентилятора $\eta_в$ или насоса $\eta_н$ зависят от их условий работы и могут быть определены по каталожным данным.

Пример 6. Насос типа ЯНЗ-3/25 с номинальной производительностью $Q_н$=12 м³/ч и скоростью вращения $n_{н.н}$=1 450 об/мин устанавливается на магистрали, где он будет работать с расчетной производительстью Q=6 м³/ч и расчетным напором H=18,5 м. Удельный вес жидкости γ=1,3 кгс/дм³. По каталожным даиным при Q==6 м³/ч к. п. д. насоса $\eta_н$=0,15. Определить мощность иа валу двигателя.

Определим расчетную производительность Q в дм³/с:

$$Q = 6\,\frac{1\,000}{3\,600} = 1{,}67 \text{ дм}^3/\text{с}.$$

Мощность $P_с$ найдем с помощью формулы (33), учитывая, что промежуточные передачи отсутствуют ($\eta_п$=1):

$$P_с = \frac{1{,}3 \cdot 1{,}67 \cdot 18{,}5}{102 \cdot 0{,}15} = 2{,}6 \text{ кВт}.$$

По каталожным даиным двигателей единой серии иаходим, что следует выбрать двигатель типа АО 42-4; $P_н$=2,8 кВт; $n_н$==1 420 об/мин, так как его мощность иаиболее близка к требуемой $P_с$ и выполняется условие (31).

Отметим, что насос типа ЯНЗ-3/25 комплектуется двигателем типа АО 51-4; $P_н$=4,5 кВт; $n_н$=1 440 об/мин. Двигатель АО 42-4 меньшего габарита и имеет другие установочные размеры, что может несколько усложнить его установку.

Мощность на валу приводного двигателя (кВт) вертикального ковшевого конвейера (элеватора) можно подсчитать по формуле

$$P_с = \frac{QH}{367\,\eta_{к.э}\eta_п}, \qquad (34)$$

где Q — производительность, тс/ч; H — высота подъема, м; $\eta_{к.э}$ — к. п. д. ковшевого элеватора.

Если известно, что заменяемый двигатель при работе загружен нормально, то можно считать, что мощность статической нагрузки $P_с$ 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. Рекомендации в отношении экспериментального определения загрузки двигателей в различных случаях приведены в § 9.

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 $P_с$ на валу представлен на рис. 17,*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

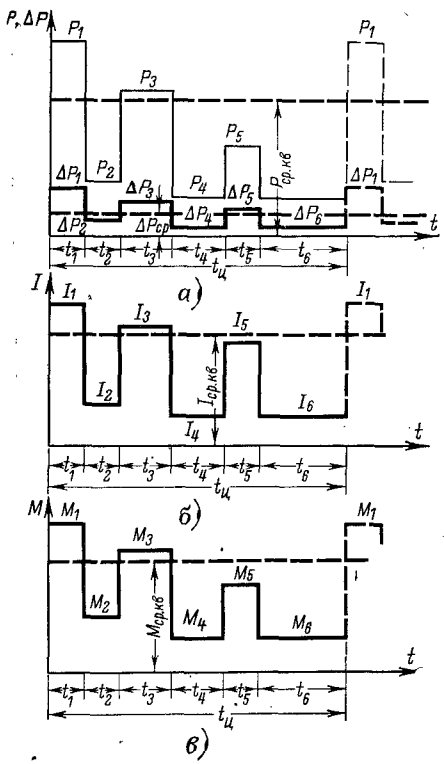


Рис. 17. Графики изменения нагрузки двигателя при работе в длительном режиме с переменной циклической нагрузкой.

с постоянной нагрузкой на валу, равной P_1, а из графика на рис. 17,*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 ΔP в двигателе (рис. 17,*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 $\Delta P_н$

$$\Delta P_{ср} \leqslant \Delta P_н. \qquad (35)$$

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

$$\Delta P_{ср} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \ldots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}, \qquad (36)$$

где ΔP_1, $\Delta P_2, \ldots, \Delta P_n$ — мощность потерь на участках рабочего цикла, кВт; t_1, $t_2, \ldots, t_n$ — длительности соответствующих участков рабочего цикла, пронумерованных индексами 1, 2, 3, ..., n, с.

Величина мощности потерь ΔP при различных загрузках двигателя при известных значениях соответствующих этим загрузкам к. п. д. может быть определена с помощью (30)

$$\Delta P = \frac{P_2(1-\eta)}{\eta}. \qquad (37)$$

Для ориентировочных расчетов значения к. п. д. можно определить с помощью кривых, приведенных на рис. 16, как это выполнено в примере 7.

Пример 7. Определить потери в двигателе типа МТК 31-6; $P_н$=11 кВт при $ПВ$=25%; $\eta_н$=0,81, при двух различных нагрузках на валу

$$P_2 = P_н; \quad P_2 = 0{,}3\,P_н.$$

Мощность потерь при номинальной нагрузке

$$\Delta P_н = P_н \frac{1-\eta_н}{\eta_н} = 11 \frac{1-0{,}81}{0{,}81} = 2{,}58 \text{ кВт}.$$

Коэффициент загрузки двигателя

$$k_з = P_2/P_н = 0{,}3.$$

По кривой *2* на рис. 16 находим относительное значение к. п. д.

$$\eta/\eta_н = 0{,}99.$$

Величина к. п. д. при коэффициенте нагрузки $k_з$=0,3

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

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

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

Мощность переменных потерь в двигателе пропорциональна квадрату тока двигателя (см. § 2). Отсюда следует другой способ проверки двигателя по нагреву: если среднеквадратичный за время цикла ток двигателя

$I_{ср.кв}$ равен номинальному току или несколько меньше его, то двигатель загружен нормально

$$I_{ср.кв} \leqslant I_н. \qquad (38)$$

Величина среднеквадратичного тока подсчитывается по графику $I=f(t)$ (рис. 17,*б*) с помощью формулы

$$I_{ср.\,кв} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (39)$$

Формулы (38) и (39) целесообразно использовать для проверки загрузки двигателя по опытной кривой тока якоря, полученной с помощью самопишущего амперметра (см. § 9).

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 (рис. 17,*в*)

$$M_{ср.\,кв} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \ldots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (40)$$

Формула (40) справедлива для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением при работе с номинальным током возбуждения, а также для асинхронных двигателей при работе на устойчивой части механической характеристики (примерно при изменении момента от 0 до 0,8 $M_{макс}$, см. рис. 14). 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:

$$P_{тр} = \frac{M_{ср.\,кв} n_н}{9\,550}.$$

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

$$P_н \geqslant P_{тр}.$$

Если можно приближенно считать, что мощность на валу двигателя пропорциональна его току, то требуемая мощность двигателя определяется непосредственно по формуле (рис. 17,*а*)

$$P_{тр} = P_{ср.\,кв} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \ldots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (41)$$

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.

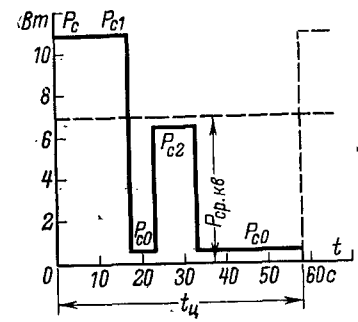


Рис. 18. График изменения статической нагрузки на валу двигателя шпинделя токарного станка.

Пример 8. На токарном станке (см. пример 1) 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 обточки цилиндрической поверхности. Положим, что по данным хронометража (или расчетам технологов) время черновой обработки $t_{м1}=17$ с, чистовой $t_{м2}=10$ с, пауз $t_{01}=6$ с, $t_{02}=25$ с. 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 1:

$$P_{с1} = \frac{P_{z1}}{\eta_1} = \frac{8{,}7}{0{,}78} = 10{,}9 \text{ кВт};$$

$$P_{с2} = \frac{P_{z2}}{\eta_2} = \frac{5{,}1}{0{,}78} = 6{,}55 \text{ кВт}.$$

Мощность на валу при холостом ходе по данным примера 1 $P_{с0}=0{,}55$ кВт.

График цикла работы представлен на рис. 18.

Определим по формуле (41) 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

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

По данным двигателей АО (приложение 1) находим, что необходимо установить двигатель АО 52-4; $P_{\text{н}} = 7$ кВт; $n_{\text{н}} = 1\,440$ об/мин, так как для него

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

Определим номинальный момент двигателя АО 52-4

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

Наибольший статический момент нагрузки

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

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

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

Перегрузочная способность двигателя

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

Допустимый момент двигателя

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

Проверим двигатель по перегрузочной способности

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

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. 19 представлена упрощенная кинематическая схема кривошипного пресса. Электродвигатель посредством клиноременной передачи приводит во вращение маховик 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 пуансона она незначительна. Соответственно упрощенный график статической нагрузки на валу двигателя может иметь вид, представленный ломаной *1* на рис. 20,*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. 20,*б*).

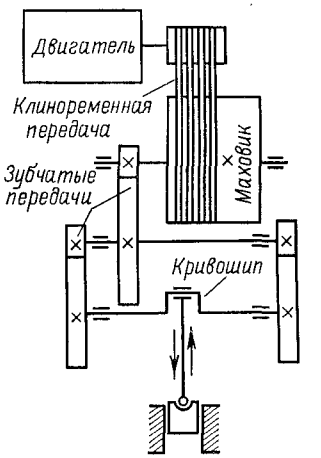


Рис. 19. Кинематическая схема кривошипного пресса.

С учетом этого через несколько циклов после начала работы скорость двигателя будет изменяться по кривой *2*, представленной на рис. 20,*а*, уменьшаясь в период штамповки $t_{\text{ш}}$ до значения $n_{\text{мин}}$ и увеличиваясь в период холостого хода $t_{\text{х}}$ до значения $n_{\text{макс}}$. В соответствии с механической характеристикой момент, развиваемый двигателем, также меняется в пределах $M_2 < M < M_1$ (кривая *3* на рис. 20,*а*).

В период штамповки $t_{\text{ш}}$ момент нагрузки $M_{\text{с}}$ 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 уменьшается и в соответствии с формулой (23) освобождается следующее количество кинетической энергии:

$$\Delta W_{\text{к}} = W_{\text{к. макс}} - W_{\text{к. мин}} = \frac{J_{\Sigma}\,(n^2_{\text{макс}} - n^2_{\text{мин}})}{182}.$$

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

При холостом ходе момент двигателя M все время больше, чем момент нагрузки $M_{\text{с}}$ (горизонтальная штриховка на рис. 20,*а*). Избыточный движущий момент двигателя совершает работу, увеличивая запас кинетической энергии вновь до значения $W_{\text{к.макс}}$. В движущихся массах привода снова запасается энергия $\Delta W_{\text{к}}$, которая будет израсходована в период следующей штамповки.

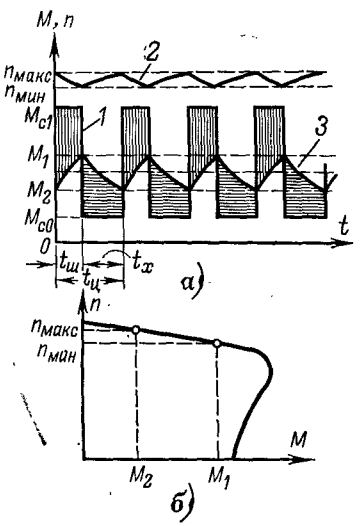


Рис. 20. Зависимости $M_{\text{с}}$, M, $n=f(t)$ маховикового электропривода (*а*); механическая характеристика двигателя (*б*).

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 значительнее снижается скорость двигателя при увеличении нагрузки на валу. Это качество механической характеристики, как указано в § 3, для асинхронных двигателей можно характеризовать величиной номинального скольжения $s_{\text{н}}$.

Расчет кривой $M=f(t)$ для маховикового привода сложен, и здесь рассмотреть его не представляется возможным. Учитывая указанные особенности работы маховиковых 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, $P_{\text{н}}=9$ кВт при длительном режиме работы, $n_{\text{н}}=1\,340$ об/мин, $U_{\text{н}}=380/220$ В, установленный на кривошипном прессе, подлежит замене для планово-предупредительного ремонта. Требуется оценить, можно ли заменить его двигателем типа АО 62-4; $P_{\text{н}}=10$ кВт; $n_{\text{н}}=1\,460$ об/мин; $U_{\text{н}}=380/220$ В.

Такая замена в случае острой необходимости может оказаться возможной при условии, что мощность выбираемого двигателя в длительном режиме работы не меньше мощности заменяемого двигателя, моменты инерции этих двигателей $J_{\text{дв}}$ различаются незначительно, скольжение выбираемого двигателя при нагрузке, равной номинальному моменту заменяемого двигателя, не меньше номинального скольжения заменяемого двигателя.

Первые два условия в данном случае выполняются. Для проверки третьего условия определим номинальный момент заменяемого двигателя

$$M_{\text{н.з}} = 9\,550\frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 9\,550\frac{9}{1\,340} = 64{,}1 \text{ Н·м}.$$

Номинальное скольжение этого двигателя

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

Номинальный момент выбираемого двигателя

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

Номинальное скольжение выбираемого двигателя

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

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

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

Следовательно, использовать двигатель АО 62-4 в данном случае нельзя, так как $s_{\text{в}} < s_{\text{н.з}}$. 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. Двигатель включается и отключается не менее 1 раза за время цикла, но в большинстве практических случаев каждый цикл работы механизма требует нескольких пусков и остановок.

Выше было установлено, 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_{Σ}. 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 повышенный пусковой момент, превосходящий статический на величину требуемого динамического момента (см. пример 5). 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 обеспечивается нормальный теплоотвод. 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, крановометаллургические), 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.

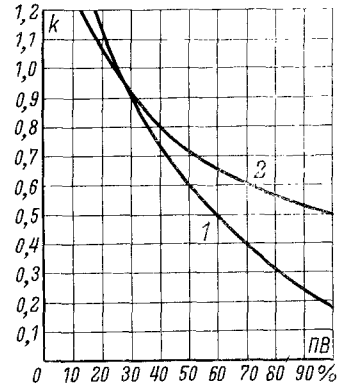


Рис. 21. Зависимости $k=f(ПВ)$ для определения допустимой нагрузки двигателей при различных продолжительностях включения.

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

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, отличной от указанной на щитке заменяемого двигателя, возникает необходимость определения нагрузки двигателя при продолжительности включения, отличающейся от паспортной.

Для этой цели можно использовать кривые $k=f(ПВ)$, приведенные на рис. 21. Коэффициент k представляет собой отношение номинальной мощности двигателя при данной продолжительности включения $ПВ$ к номинальной мощности при $ПВ=25\%$.

$$k=P_{ПВ}/P_{ПВ=25\%}.$$

Если номинальная мощность двигателя соответствует номинальной продолжительности включения $ПВ_н$, не равной 25%, пересчет мощности (кВт) к любой продолжительности включения $ПВ$ может быть произведен по формуле

$$P_{ПВ}=\frac{k_{ПВ}}{k_{ПВ_н}}P_{ПВ_н}, \qquad (42)$$

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

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

$$I_{ПВ}=\frac{k_{ПВ}}{k_{ПВ_н}}I_{ПВ_н};M_{ПВ}=\frac{k_{ПВ}}{k_{ПВ_н}}M_{ПВ_н}. \qquad (43)$$

Формулы (42) и (43) могут быть использованы при отсутствии каталожных данных и для определения допустимой нагрузки двигателя в длительном режиме работы, т. е. при 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 *1* на рис. 21 можно видеть, что допустимая нагрузка двигателей серий КТ и КТК в длительном режиме мала. Фактически ряд двигателей этих ранее выпускавшихся серий был сконструирован таким образом, что для них недопустим длительный режим работы даже на холостом ходу. Поэтому двигатели серий КТ и КТК использовать при ПВ>60% не следует.

Пример 10. Необходимо заменить двигатель вентилятора, работающего в длительном режиме, причем в резерве нет подходящего двигателя для длительного режима работы. Заменяется двигатель типа АО 51-6 с $P_н$=2,8 кВт; $U_н$=220/380 В; $n_н$=950 об/мин; коэффициент загрузки двигателя (по данным опыта) $k_з$=0,8. Имеется крановый двигатель типа МТК 21-6; $P_н$=5 кВт при $ПВ$=25%; $U_н$=220/380 В; $n_н$=910 об/мин. Требуется проверить, удовлетворяет ли этот двигатель условиям работы вентилятора.

Номинальный момент заменяемого двигателя

$$M_{н.уст}=9\,550\frac{P_н}{n_н}=9\,550\frac{2,8}{950}=28,2\ Н\cdot м.$$

Статический момент нагрузки

$$M_с=k_з M_{н.уст}=0,8\cdot 28,2=22,6\ Н\cdot м.$$

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

$$M_{н\,(ПВ=25\%)}=9\,550\frac{5}{910}=52,5\ Н\cdot м.$$

Для определения допустимого момента этого двигателя в длительном режиме находим по кривой *2* на рис. 21 значения $k_{ПВ=25\%}$=1,0 и $k_{ПВ=100\%}=0,5$. Далее, по формуле (43) определяем величину допустимого момента

$$M_{н\,(ПВ=100\%)}=\frac{k_{ПВ=100\%}}{k_{ПВ=25\%}}M_{н\,(ПВ=25\%)}=$$

$$=\frac{0,5}{1,0}\cdot 52,5=26,3\ Н\cdot м.$$

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

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

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 переходных процессов $t_{п.п}$ и временем установившейся работы двигателя.

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

Однако более часто $t_{уст}/t_{п.п}>10$. В этих случаях можно считать, что нагрев двигателя определяется только статической нагрузкой его.

Простейшие способы определения времени пуска показаны в примерах 4 и 5. 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 $t_{уст}/t_{п.п}\gg 10$ в случае, когда известен цикл работы механизма, поясняется следующим примером.

Пример 11. По паспорту мостового магнитного крана грузоподъемностью 10 тс его механизм подъема рассчитан на средний режим работы с продолжительностью включения $ПВ_н$=25%. Статические нагрузки механизма подъема этого крана рассчитаны в примере 2. 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 — 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:

$$t_{р1}=\frac{H_1}{v_н}=\frac{12}{0,33}=36,4 \text{ с.}$$

Время спуска груза $t_{р2}\approx t_{р1}=36,4$ с.

Аналогично продолжительность подъема и спуска магнита без груза

$$t'_{р1}=t'_{р2}=\frac{H_2}{v_н}=\frac{7}{0,33}=21,2 \text{ с.}$$

Время пуска привода на подъем груза по данным примера 5 составляет $t_п=0,825$ с. Так как $t_п \ll t_{р1}$, динамические нагрузки можно не учитывать.

Суммарное время работы в цикле

$$\Sigma t_р=2t_{р1}+2t'_{р1}=2\cdot 36,4+1\cdot 21,2=115,2 \text{ с.}$$

Время цикла

$$t_ц=\frac{3\,600}{N_ц}=\frac{3\,600}{15}=240 \text{ с.}$$

Действительная продолжительность включения двигателя

$$ПВ=\frac{\Sigma t_р}{t_ц}\cdot 100=\frac{115,2}{240}\cdot 100=48\%.$$

Суммарное время пауз

$$\Sigma t_0=t_ц-\Sigma t_р=240-115,2=124,8 \text{ с.}$$

Приннмая условно продолжительиости всех пауз одинаковыми, определим продолжительность одной паузы

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

По этим данным и по данным примера 2 построен график нагрузки двигателя в зависимости от времени, приведенный на рис. 22,*а*. Нетрудно видеть, что реальный цикл работы двигателя, приведенный на этом рисунке, отличается от номинального цикла при ПВ=25%, приведенного на рис. 11. Сравнивать нагрузки двигателя можно лишь при одинаковых условиях его работы. Поэтому расчет потребной мощности при повторно-кратковременном режиме работы сводится к приведению графика действительного режима работы (рис. 22,*а*) к графику номинального режима (см. рис. 11).

График номинального режима соответствует одному включению двигателя, а действительный график в примере содержит четыре включения. Так как динамические нагрузки не учитываются, можно считать, что двигатель включается 1 раз, работает время $\Sigma t_р$ с переменной нагрузкой, а затем отключается на время Σt_0 (рис. 22,*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

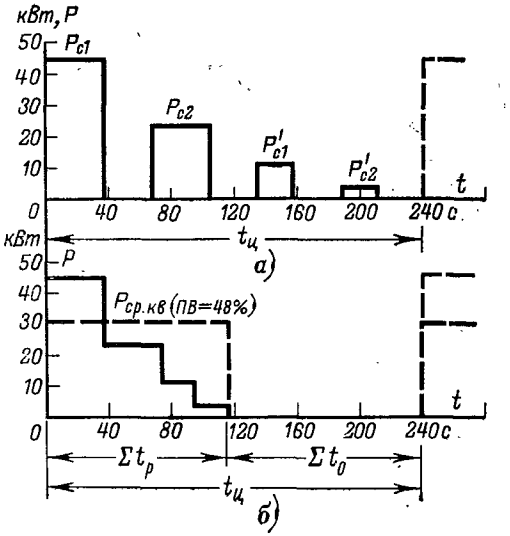


Рис. 22. Действительный цикл работы подъемной лебедки мостового магнитного крана (*а*) и расчетный (*б*).

параграфе отмечалось, что среднеквадратичная нагрузка равноценна в отношении нагрева двигателя действительной переменной нагрузке за одно и то же время $\Sigma t_р$

$$P_{ср.кв\ ПВ}=\sqrt{\frac{P_1^2 t_{р1}+P_2^2 t_{р2}+(P'_1)^2 t'_{р1}+(P'_2)^2 t'_{р2}}{\Sigma t_р}}. \qquad (44)$$

В данном примере

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

$$=30,3 \text{ кВт.}$$

Заменив на рис. 28,*б* ступенчатый график нагрузки постоянной за время работы нагрузкой $P_{ср.кв\ (ПВ=48\%)}$, получим расчетный график, отличающийся от графика номинального режима только про-

должительностью включения. Пересчитаем по формуле (42) среднеквадратичную мощность к номинальной продолжительности включения $ПВ=25\%$. По кривой *2* на рис. 21 находим:

$$k_{ПВ=25\%}=1,\ k_{ПВ=48\%}=0,72.$$

Следовательно,

$$P_{ср.кв\ (ПВ=25\%)}=\frac{k_{ПВ=25\%}}{k_{ПВ=48\%}}P_{ср.кв\ (ПВ=48\%)}=$$

$$=\frac{1,0}{0,72}\cdot 30,3=42\ кВт.$$

Величина $P_{ср.кв\ (ПВ=25\%)}$ является потребной мощностью двигателя при ПВ = 25%. Следовательно, действительная нагрузка при заданном цикле работы является допустимой для установленного на лебедке двигателя (см. пример 2), так как

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

Отметим, что при практических расчетах график, приведенный на рис. 22,*б*, можно не строить. Здесь он потребовался только для пояснения смысла расчетов по формулам (42)—(44).

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

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

Номинальный момент двигателя

$$M_н=9\,550\frac{45}{577}=745\ Н\cdot м.$$

Максимально допустимый момент двигателя

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

Максимальный момент двигатель должен развивать при пуске на подъем с грузом (см. пример 5)

$$M_{макс.р}=M_{п1}=1\,280\ Н\cdot м.$$

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

Наряду с двигателями краново-металлургических серий для привода механизмов повторно-кратковременного режима широко используются двигатели общепромышленного применения, 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 П, 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 можно применить метод расчета, изложенный в примере 11, полагая $ПВ_н=100\%$ и пользуясь кривой *2* на рис. 21. Необходимо помнить, что двигатели, рассчитанные на длительный режим, имеют меньшую перегрузочную способность, чем двигатели на повторно-кратковременный режим. Поэтому особенно тщательно нужно проверять их по перегрузочной способности.

3. Выбирается двигатель с самовентиляцией. Этот случай рассмотрим несколько подробнее.

Выше уже отмечалось, что двигатель с самовентиляцией при повторно-кратковременном режиме имеет нормальные условия охлаждения только при работе с установившейся скоростью, а при пусках, торможениях и остановках охлаждение его ухудшается. Это обстоятельство должно учитываться в расчетах соответствующим завышением потребной мощности двигателя по сравнению с двигателем, имеющим независимую вентиляцию. Метод приближенного учета ухудшения теплоотдачи поясним следующим примером.

Пример 12. В связи с выходом из строя необходимо заменить установленный на приводе грузового подъемника крановый двигатель с кольцами типа МТ 31-6; номинальный режим $ПВ=25\%$; $P_н=11$ кВт; $U_н=220/380$ В; $n_н=953$ об/мин; ток статора $I_{1н}=49/29,4$ А.

В резерве имеется двигатель с контактными кольцами типа АК 61-6 с длительным режимом; $P_н=7,0$ кВт; $U_н=220/380$ В; $n_н=940$ об/мин; $I_{1н}=29,2/16,8$ А; $J_{дв}=0,238$ кг·м^2; отношение максимального момента к номинальному $M_{макс}/M_н=2,0$. Необходимо проверить, можно ли заменить этим двигателем вышедший из строя двигатель. Кинематическая схема лебедки приведена на рис. 23,*а*.

Технические данные подъемника; скорость подъема $v_н=0{,}75$ м/с; номинальная грузоподъемность $G_н=1{,}5$ тс; вес кабины $G_к=3{,}2$ тс; вес противовеса $G_{пр}=3{,}95$ тс; к. п. д. лебедки $\eta_л=0{,}7$; требуемое ускорение при пуске и торможении $a=0{,}5$ м/с². Цикл работы подъемника: подъем тележки весом $G_т=0{,}4$ тс с грузом $G_{гр}=1{,}1$ тс; пауза, во время которой груженая 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

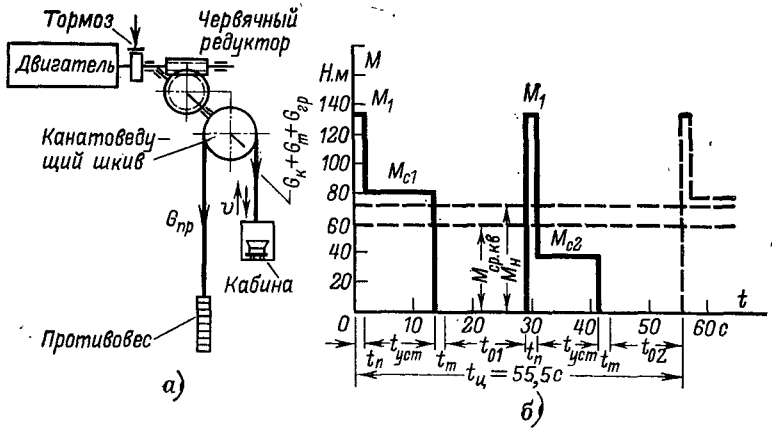


Рис. 23. Кинематическая схема (*а*) и график нагрузки двигателя грузового подъемника (*б*).

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)

$$t_п=\frac{v_н}{a}=\frac{0{,}75}{0{,}5}=1{,}5 \text{ с}.$$

Время торможения

$$t_т=t_п=1{,}5 \text{ с}.$$

Путь, проходимый кабиной с установившейся скоростью:

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

Время движения с установившейся скоростью

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

Время цикла

$$t_ц=\frac{3\,600}{N_ц}=\frac{3\,600}{65}=55{,}5 \text{ с}.$$

Суммарное время пауз (см. рис. 23,*б*)

$$t_{01}+t_{02}=t_ц-2t_п-2t_т-2t_{уст}=55{,}5-2\cdot 1{,}5-2\cdot 1{,}5-2\cdot 10{,}5=28{,}5 \text{ с}.$$

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

$$P_{с1}=\frac{(G_к+G_т+G_{гр}-G_{пр})v_н}{102\eta_л}=$$

$$=\frac{(3\,200+400+1\,100-3\,950)\cdot 0{,}75}{102\cdot 0{,}7}=7{,}9 \text{ кВт}.$$

Статический момент при подъеме

$$M_{с1}=9\,550\frac{P_{с1}}{n_н}=9\,550\frac{7{,}9}{953}=79{,}3 \text{ Н·м}.$$

Мощность на валу двигателя при спуске

$$P_{с2}=\frac{(G_{пр}-G_к-G_т)v_н}{102\eta_л}=$$

$$=\frac{(3\,950-3\,200-400)0{,}75}{102\cdot 0{,}7}=3{,}7 \text{ кВт}.$$

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

$$M_{с2}=9\,550\frac{P_{с2}}{n_н}=9\,550\frac{3{,}7}{953}=37{,}1 \text{ Н·м}.$$

Определим динамический момент. С этой целью найдем по формулам (22) и (24) суммарный момент инерции на валу двигателя. Здесь коэффициент 1,3 учитывает запас кинетической энергии во всех вращающихся частях лебедки; $m_п$ — сумма всех поступательно движущихся масс:

$$m_п=m_{пр}+m_к+m_т+m_{гр}=3\,950+3\,200+400+1\,000=8\,650 \text{ кг}.$$

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

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

Определим динамический момент при пуске на подъем

$$M_{дин}=\frac{J_Σ}{9{,}55}a_{вр}=\frac{J_Σ}{9{,}55}\cdot\frac{n_н}{t_п}=\frac{0{,}8}{9{,}55}\cdot\frac{953}{1{,}5}=53 \text{ Н·м}.$$

Требуемый пусковой момент двигателя

$$M_{п1}=M_{с1}+M_{дин}=79{,}3+53=132{,}3\ \text{Н}\cdot\text{м}.$$

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 $M_{с1}>M_{с2}$.

По полученным расчетным данным на рис. 23,*б* построен график момента, развиваемого двигателем на различных участках рабочего цикла. По этому графику с помощью формулы (40) 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 (40). По данным опыта 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 (40) для графика, приведенного на рис. 23,*б*, можно записать так:

$$M_{ср.кв}=\sqrt{\frac{M_{п1}^2 t_п + M_{с1}^2 t_{уст} + M_{п1}^2 t_п + M_{с2}^2 t_{уст}}{0{,}5(t_{о1}+t_{о2}) + 0{,}75(2t_п + 2t_т) + 2t_{уст}}}.$$

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

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

Номинальный момент выбираемого двигателя

$$M_н=9\,550\,\frac{7}{940}=71{,}1\ \text{Н}\cdot\text{м}.$$

Двигатель АК 61-6 по нагреву имеет вполне достаточный момент

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

Необходимо проверить двигатель по перегрузочной способности. Максимально допустимый момент двигателя

$$M_{доп}=0{,}81(M_{макс}/M_н)M_н=0{,}81\cdot 2\cdot 71{,}1=115\ \text{Н}\cdot\text{м}.$$

Двигатель не обладает достаточной перегрузочной способностью, так как

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

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

$$P_{тр}=\frac{M_{ср.кв}n_н}{9\,550}=\frac{58\cdot 953}{9\,550}=6{,}1\ \text{кВт}.$$

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

$$P_н\geqslant P_{тр}=6{,}1\ \text{кВт};$$

$$M_{доп}=0{,}81(M_{макс}/M_н)M_н\geqslant M_{п1}=132{,}3\ \text{Н}\cdot\text{м}.$$

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 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 сложно. В случае, когда продолжительность работы двигателя в условиях работы механизма не превышает 1,5—2,5 мин, можно рекомендовать выбирать двигатель повторно-кратковременного режима. С этой целью нужно рассмотренными выше способами подсчитать наибольшие статическую и динамическую нагрузки и определить максимальный требуемый момент двигателя $M_{макс.р}$. Затем необходимо подобрать двигатель повторно-кратковременного режима, для которого наиболее близко выполняется условие

$$M_{доп}\geqslant M_{макс.р}.$$

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[1]. 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 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. Если ротор выполнен с круглыми пазами, то начальный пусковой момент двигателя $M_п$ невелик. Ввести добавочное сопротивление в цепь ротора и тем самым уменьшить пусковой ток и увеличить пусковой момент двигателя здесь невозможно. 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

[1] Вопросы пуска двигателей и расчета пусковых сопротивлений подробно изложены в одном из предыдущих выпусков «Библиотеки электромонтера» [Л. 2].

двигателя под нагрузкой. Если пусковой момент меньше момента нагрузки на валу, то двигатель будет заторможен нагрузкой и 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 $I_п/I_н$ и кратность пускового момента $M_п/M_н$.

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. Кроме того, специальное исполнение короткозамкнутого ротора несколько ограничивает и пусковой ток двигателя. Повышенным пусковым моментом обладают, в частности, 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, как это выполнено в примере 15.

Второе важное отличие двигателя с короткозамкнутым ротором от двигателя с фазовым ротором 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 и продолжительности времени пуска.

Если сравнить потери энергии при пуске двигателя с фазовым ротором 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 фазовым ротором. Аналогичные соотношения имеют место и при торможении двигателя с ко-

роткозамкнутым ротором путем противовключения (противотоком).

Большие потери при пусках и торможениях асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором вызывают его дополнительный нагрев. При длительном режиме работы, когда двигатель пускается всего несколько раз в смену, этот дополнительный нагрев в среднем невелик 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 (кВт·с), выделяющееся в двигателе за время пуска с нагрузкой на валу, можно подсчитать по приближенной формуле

$$\Delta A_{\text{п}} = 10^{-3} k_{\text{п}} \frac{J_{\Sigma} n_0^2}{182} \frac{M_{\text{п. ср}}}{M_{\text{п. ср}} - M_{\text{с}}}, \qquad (45)$$

где J_{Σ} — суммарный момент инерции на валу двигателя, кг·м^2; n_0 — синхронная скорость вращения, об/мин; $M_{\text{п.ср}}$ — средний пусковой момент (см. пример 4), Н·м; $M_{\text{с}}$ — статический момент нагрузки на валу, Н·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 (кВт·с), выделяющееся в двигателе, можно подсчитать по аналогичной формуле

$$\Delta A_{\text{т}} = 10^{-3} k_{\text{т}} \frac{J_{\Sigma} n_0^2}{182} \frac{M_{\text{т. ср}}}{M_{\text{т. ср}} + M_{\text{с}}}, \qquad (46)$$

здесь $M_{\text{т.ср}}=0{,}9M_{\text{п}}$ — средний тормозной момент двигателя (см. пример 4), Н·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 нормальных условий нагрева двигателя должно выполняться условие (35)

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

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

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta A_{\text{п}\Sigma}}{t_{\text{ц}}}. \qquad (47)$$

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

$$t_{\text{ц}} = \frac{3\,600}{N}.$$

При большом числе включений N основную долю в суммарных потерях энергии $\Delta A_{\text{п}\Sigma}$ 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 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 совершать 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. Пуско-

вые 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.

Большей допустимой частотой включений обладают асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором крановометаллургических серий, специально предназначенные для повторно-кратковременного режима. Эти двигатели имеют относительно меньший момент инерции ротора. Поэтому потери энергии в соответствии с формулами (45) и (46) 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 отличен от аналогичного расчета для двигателя длительного режима работы. Разницу можно уяснить из сравнения двух приведенных ниже примеров расчета.

Пример 13. 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 $P_c = P_н$, при втором $P_c = 0{,}3\ P_н$. Число циклов в час $N_ц = 120$. Действительная продолжительность включения $ПВ = 30\%$. Торможение осуществляется механическим тормозом при отключении двигателя. Суммарный момент инерции на валу двигателя $J_Σ = 1{,}35\ J_{дв}$.

Данные двигателя: $P_н = 11$ кВт при $ПВ = 25\%$; $n_н = 920$ об/мин; к. п. д. при номинальной нагрузке $\eta_н = 0{,}81$; $M_{макс}/M_н = 3{,}4$; $M_п/M_н = 3{,}2$; $I_п/I_н = 5{,}1$; момент инерции ротора $J_{дв} = 0{,}25$ кг·м².

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 7 для двигателя МТК 31-6

$$\Delta P_{уст1} = \Delta P_н = 2{,}58 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{уст2} = \Delta P_{0,3} = 0{,}815 \text{ кВт}.$$

Суммарный момент инерции на валу двигателя

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

Номинальный момент двигателя

$$M_н = 9\,550 \frac{P_н}{n_ц} = 9\,550 \frac{11}{920} = 114 \text{ Н·м}.$$

Пусковой момент

$$M_п = (M_п/M_н) M_н = 3{,}2 \cdot 114 = 366 \text{ Н·м}.$$

Максимальный момент

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

Средний пусковой момент

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

Время цикла

$$t_{\text{ц}} = \frac{3\,600}{N_{\text{ц}}} = \frac{3\,600}{120} = 30 \text{ с.}$$

Суммарное время работы

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

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

Потери энергии за время первого пуска определим по формуле (45), приняв $k_{\text{п}} = 1{,}5$, так как двигатель имеет повышенное скольжение ($s_{\text{н}} = 8\%$):

$$\Delta A_{\text{п1}} = 10^{-3} \cdot 1{,}5 \frac{0{,}337 \cdot 1\,000^2}{182} \cdot \frac{377}{377 - 114} = 4{,}0 \text{ кВт·с.}$$

То же при втором пуске

$$\Delta A_{\text{п2}} = 10^{-3} \cdot 1{,}5 \frac{0{,}337 \cdot 1\,000^2}{182} \cdot \frac{377}{377 - 0{,}3 \cdot 114} = 3{,}06 \text{ кВт·с.}$$

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

$$\Delta P_{\text{ср30\%}} = \frac{\Delta A_{\text{п1}} + \Delta P_{\text{уст1}} t_{\text{уст1}} + \Delta A_{\text{п2}} + \Delta P_{\text{уст2}} t_{\text{уст2}}}{t_{\text{р1}} + t_{\text{р2}}} =$$

$$= \frac{4{,}0 + 2{,}58 \cdot 4{,}5 + 3{,}06 + 0{,}815 \cdot 4{,}5}{4{,}5 + 4{,}5} = 2{,}38 \text{ кВт.}$$

Здесь с целью упрощения приближенно принято $t_{\text{уст1}} = t_{\text{уст2}} \approx t_{\text{р1}}$.

Номинальная мощность потерь $\Delta P_{\text{н}} = 2{,}58$ кВт соответствует режиму $ПВ_{\text{н}} = 25\%$. Чтобы получить возможность сравнивать потери, нужно привести средние потери $\Delta P_{\text{ср30\%}}$ к номинальной продолжительности включения по формуле

$$\Delta P_{\text{ср25\%}} = \Delta P_{\text{ср30\%}} \frac{ПВ}{ПВ_{\text{н}}} = 2{,}38 \frac{30}{25} = 2{,}86 \text{ кВт.}$$

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

$$\Delta P_{\text{ср25\%}} = 2{,}86 \text{ кВт} > \Delta P_{\text{н25\%}} = 2{,}58 \text{ кВт.}$$

Отметим, что если бы в данном случае использовалось торможение противовключением, в числитель формулы средних потерь $\Delta P_{\text{ср30\%}}$ следовало бы прибавить потери при торможеннях $\Delta A_{\text{т1}}$ и $\Delta A_{\text{т2}}$, подсчитанные по формуле (46). При этом перегрузка двигателя по нагреву была бы еще более значнтельной.

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) $\Delta A_{\text{п0}}$ и при торможении противовключением в таких же условиях $\Delta A_{\text{т0}}$.

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

Пример 14. Требуется проверить по нагреву установленный на приводе шпинделя токарного станка (см. пример 1) 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 $P_{\text{с1}} = 4{,}22$ кВт — торможение двигателя противовключением вхолостую — пауза — второй пуск двигателя вхолостую — резание с нагрузкой $P_{\text{с2}} = 3{,}16$ кВт — торможение противовключением — пауза.

По данным технологов время резания на первом участке цикла $t_{\text{м1}} = 120$ с, на втором $t_{\text{м2}} = 95$ с. Времена пауз: $t_{\text{о1}} = 6$ с; $t_{\text{о2}} = 20$ с. По даниым примера 1 $M_{\text{с1}} = 28$ Н·м; $M_{\text{с2}} = 21$ Н·м.

По данным примера 4 время пуска и торможения $t_{\text{п0}} = 0{,}15$ с; $t_{\text{т0}} = 0{,}2$ с; $t_{\text{п1}} = t_{\text{п2}} = 0{,}202$ с; $t_{\text{т1}} = t_{\text{т2}} = 0{,}228$ с.

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

$$k_{\text{з1}} = \frac{P_{\text{с1}}}{P_{\text{н}}} = \frac{4{,}22}{4{,}5} = 0{,}94;$$

$$k_{\text{з2}} = \frac{P_{\text{с2}}}{P_{\text{н}}} = \frac{3{,}16}{4{,}5} = 0{,}69.$$

Находим соответствующие к. п. д. для двигателя АО 51-4 аналогично тому, как было сделано в примере 7:

$$\eta_1 = 0{,}855; \quad \eta_2 = 0{,}86.$$

Потери в двигателе при резании

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

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

Потери энергии за время каждого пуска

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

То же при каждом торможении

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

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:

$$\Delta P_{ср} = \frac{2\Delta A_п + 2\Delta A_т + \Delta P_{уст1} t_{м1} + \Delta P_{уст2} t_{м2}}{0{,}5\,(t_{о1} + t_{о2}) + 0{,}75\,(2t_{п1} + 2t_{т1}) + t_{м1} + t_{м2}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 2{,}41 + 2 \cdot 4{,}2 + 0{,}72 \cdot 120 + 0{,}5 \cdot 95}{0{,}5\,(6 + 20) + 0{,}75\,(2 \cdot 0{,}202 + 2 \cdot 0{,}228) + 120 + 95} = 0{,}645 \text{ кВт}.$$

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

$$\Delta P_н = P_н \frac{1 - \eta_н}{\eta_н} = 4{,}5 \frac{1 - 0{,}885}{0{,}855} = 0{,}762 \text{ кВт}.$$

Следовательно, двигатель нагружен по нагреву нормально, так как

$$\Delta P_{ср} = 0{,}645 \text{ кВт} < \Delta P_н = 0{,}762 \text{ кВт}.$$

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

9. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАГРУЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ

Важной особенностью выбора двигателей в условиях эксплуатации является возможность экспериментальной проверки их загрузки на действующем производственном механизме. Этой возможностью следует широко пользоваться во всех практических случаях, когда по тем или иным причинам возникают сомнения в отношении соответствия установленного двигателя условиям работы на данном производственном механизме.

В зависимости от режима работы механизма подход к оценке загрузки двигателя опытным путем должен быть различным. Возможные случаи такой оценки следует разделить на две группы. К первой группе относятся случаи, когда оценка загрузки двигателя по нагреву может быть произведена по результатам статических замеров потребляемого двигателем тока или мощности. Ко второй группе относятся случаи, когда для оценки загрузки двигателя по нагреву необходимо экспериментальное определение нагрузочных диаграмм, т. е.

зависимостей тока двигателя от времени в рабочих циклах механизма.

Первую группу составляют механизмы, работающие в длительном режиме работы с неизменной нагрузкой. Для большинства таких механизмов достаточно надежной характеристикой условий работы двигателя может служить коэффициент загрузки двигателя по току силовой цепи $k_з = I/I_н$, который несложно определить экспериментально. Для этой цели последовательно в цепь якоря двигателя постоянного тока необходимо включить измерительный шунт, номинальный ток которого в 1,5—2 раза больше, чем номинальный ток двигателя, и к его измерительным зажимам подключить милливольтметр. После запуска двигателя необходимо обеспечить рабочий режим механизма, загрузив его обычной полезной нагрузкой, и произвести замер показаний милливольтметра. Соответствующее значение тока (А) подсчитывается по формуле

$$I = bn,$$

где b — цена деления милливольтметра, А/дел; n — показание милливольтметра, дел.

Цена деления (А/дел) определяется по соотношению

$$b = \frac{I_{ш.н}}{N_{пр}} \frac{U_{пр.н}}{U_{ш.н}},$$

где $I_{ш.н}$, $U_{ш.н}$ — соответственно номинальные ток и напряжение шунта; $U_{пр.н}$, $N_{пр}$ — номинальное напряжение милливольтметра и число делений на его шкале.

По известной величине номинального тока двигателя определяется экспериментальный коэффициент загрузки по току. Аналогично можно определить коэффициент загрузки по току статора асинхронного двигателя. При этом для расширения пределов измерения тока в одну фазу статора следует включить измерительный трансформатор тока с номинальным первичным током, превышающим измеряемый, и ко вторичным зажимам его подключить амперметр. На время запуска двигателя, особенно с короткозамкнутым ротором, целесообразно шунтировать прибор предусмотренным для этой цели ключом во избежание его перегрузок пусковым током. Цена деления прибора (А), включенного через трансформатор тока, определяется по формуле

$$b = k_{т.т} \frac{I_{пр.н}}{N_{пр}},$$

где $k_{т.т}=I_{1н(т.т)}/I_{2н(т.т)}$ — коэффициент трансформации трансформатора тока; $I_{пр.н}$ — номинальный ток прибора.

Оценка условий работы двигателя по нагреву с помощью коэффициента загрузки по току достоверна только при номинальных значениях всех остальных параметров двигателя. Поэтому при измерении тока двигателя постоянного тока необходимо одновременно замерить с помощью тахометра его скорость вращения и с помощью вольтметров — напряжения на якоре двигателя и обмотке независимого возбуждения. Для асинхронного двигателя в процессе опыта необходимо измерить величину напряжения сети. Все указанные величины должны соответствовать паспортным данным двигателя.

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением коэффициенты загрузки по току, моменту и мощности на валу примерно одинаковы. Для асинхронного двигателя пропорциональность между током статора и моментом отсутствует, поэтому коэффициент загрузки по току статора может существенно отличаться от коэффициента загрузки по мощности на валу. При необходимости коэффициент загрузки по мощности на валу может быть определен по данным опыта методом, изложенным в примере 15.

Пример 15. Асинхронный двигатель типа А 62-6; $P_н=10$ кВт; $U_н=380$ В; $I_{1н}=21{,}5$ А; $n_н=970$ об/мин; $\eta_н=0{,}865$ установлен на приводной станции цепного подвесного 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. 24. Полагая, что читатель практически знаком с измерительной техникой, останавливаться на описании схем измерения не будем. Напомним лишь, что в этих схемах цена деления ваттметров (Вт/дел) может быть подсчитана по формуле

$$b=\frac{I_{1н(т.т)}U_{д.с}}{N_{пр}},$$

где $I_{1н(т.т)}$ — номинальный ток трансформатора тока, А; $U_{д.с}$ — напряжение, указанное на клемме добавочного сопротивления *1ДС (2ДС)*, подсоединяемой к силовой цепи, В; $N_{пр}$ — число делений шкалы ваттметра.

При замере мощности в схеме на рис. 24,*а* получены следующие показания ваттметров:

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

В этом случае мощность, потребляемая двигателем, подсчитывается по формуле

$$P_1=P_{1w}+P_{2w}=562+3\,938=4\,500 \text{ Вт}=4{,}5 \text{ кВт}.$$

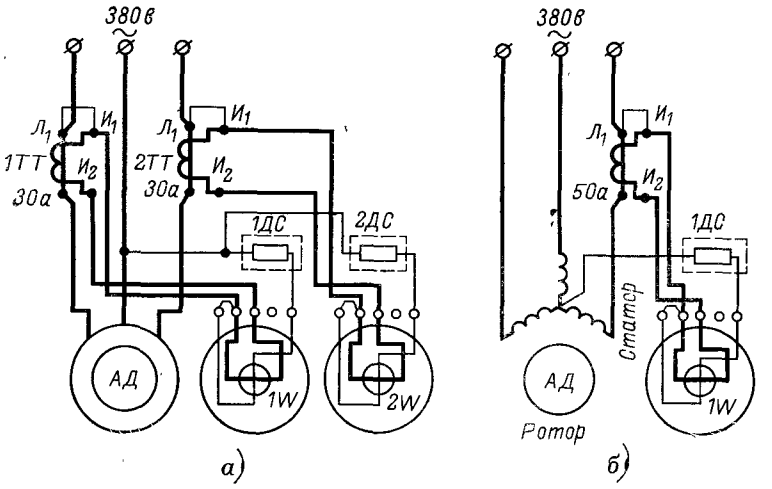


Рис. 24. Схемы измерения мощности, потребляемой асинхронным двигателем из сети.

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

В схеме на рис. 24,*б* получено показание $P_{1w}=1\,500$ Вт.

При этом мощность, потребляемая двигателем из сети, подсчитывается по формуле

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

Приближенно подсчитывается коэффициент загрузки двигателя по мощности

$$k_з=\frac{P_с}{P_н}\approx\frac{P_1\eta_н}{P_н}=\frac{4{,}5\cdot 0{,}865}{10}=0{,}39.$$

Определим к. п. д. двигателя при $k_з=0{,}39$ с помощью кривых, приведенных на рис. 16:

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

Уточненное значение мощности на валу двигателя

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

Соответствующий статический момент на валу двигателя

$$M_с\approx 9\,550\frac{P_с}{n_н}=9\,550\frac{3{,}73}{970}=36{,}7 \text{ Н·м}.$$

Если в резерве имеется двигатель типа А 52-6; $P_н=4{,}5$ кВт; $U_н=380$ В; $I_{1н}=10{,}1$ А; $n_н=950$ об/мин, то целесообразно заменить

нм 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.

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 выше экспериментальным путем.

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

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

Требуемый пусковой момент определяется по формуле

$$M_{\text{п.треб}}=M_{\text{с.п}}+M_{\text{дин}}.$$

При пуске конвейеров можно принимать

$$M_{\text{дин}}\approx 0{,}2\ M_{\text{с.п}}.$$

Следовательно, требуемый пусковой момент

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

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

$$M_{\text{п}}/M_{\text{н}}=1{,}5.$$

Номинальный момент

$$M_{\text{н}}=9\,550\,\frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}}=9\,550\,\frac{4{,}5}{950}=45{,}2\ \text{Н}\cdot\text{м}.$$

Пусковой момент

$$M_{\text{п}}=(M_{\text{п}}/M_{\text{н}})\,M_{\text{н}}=1{,}5\cdot 45{,}2=67{,}8\ \text{Н}\cdot\text{м}.$$

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

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

В нашем случае

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

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

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

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.

Ко второй из указанных выше групп относятся механизмы, работающие в длительном режиме с циклически меняющейся нагрузкой, а также механизмы повторно-кратковременного режима работы. Для подобных механизмов для правильного суждения о загрузке двигателей по нагреву необходимо построение нагрузочных диаграмм $I=f(t)$, которое по данным эксперимента может быть осуществлено путем измерения тока силовой цепи на отдельных участках цикла с одновременным хронометражем длительности действия соответствующих нагрузок либо путем непосредственной записи зависимости $I=f(t)$ с помощью самопишущего амперметра или с помощью шлейфового осциллографа.

Первый способ является наиболее простым и доступным в условиях эксплуатации. Однако пользоваться им можно только в тех случаях, когда рабочий цикл возможно разбить на конечное число отрезков времени, в течение каждого из которых ток двигателя остается неизменным, а величина наименьшего отрезка времени достаточна для отсчета установившегося показания прибора. Такие условия характерны для механизмов, длительность рабочего цикла которых составляет несколько минут (см. примеры 8 и 11).

Для проведения опыта нужно собрать схему измерения тока, включить установку в нормальный рабочий режим и в течение нескольких циклов понаблюдать по прибору изменения тока нагрузки. В результате наблюдений должно быть определено число участков рабочего цикла и составлена таблица для записи данных замеров тока и длительности работы на каждом участке цикла. Затем необходимо провести соответствующие замеры тока с одновременной фиксацией продолжительностей работы по секундомеру, повторив их в течение нескольких циклов.

Полученные в результате измерений данные позволят построить для каждого цикла нагрузочные диаграммы двигателя $I=f(t)$, которые при длительном режиме работы будут иметь вид, аналогичный графику на рис. 17,*б*, а при повторно-кратковременном — аналогичный графику на рис. 22,*а*. Далее необходимо с помощью (39) вычислить величины среднеквадратичных токов и по полученному наибольшему значению $I_{\text{ср.кв}}$ проверить загрузку двигателя по нагреву по условию (38).

Необходимо иметь в виду, что в случае повторно-кратковременного режима рассмотренный способ можно применять, когда заведомо известно, что динамические нагрузки при пусках и торможениях не оказывают заметного влияния на нагрев двигателя. Как было указано в § 6, ориентировочно судить о влиянии динамических нагрузок на нагрев можно, сравнивая длительность переходных процессов с длительностью установившегося режима работы двигателя, причем должно выполняться условие $t_{уст} \gg t_{п.п}$.

Необходимость автоматической записи кривой $I=f(t)$ возникает в тех случаях, когда в цикле работы механизма нагрузка меняется непрерывно, т. е. график изменения тока существенно отличается от рассмотренных выше простейших ступенчатых нагрузочных диаграмм. При этом, если нагрузка изменяется во времени относительно медленно, а длительность цикла работы измеряется несколькими десятками секунд, запись кривой $I=f(t)$ может быть произведена с помощью самопишущего амперметра. Скорость движения бумаги в самописце следует установить такой, чтобы за время цикла работы механизма бумага перемещалась на 5—20 см.

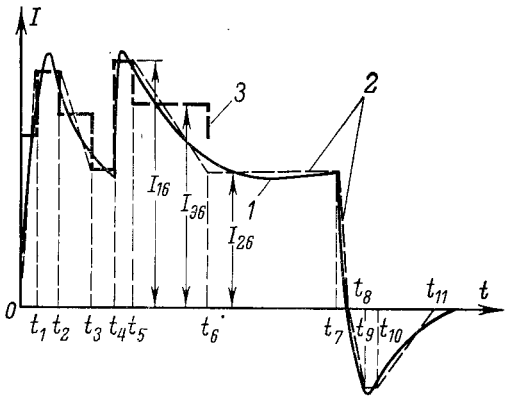


Рис. 25. Обработка экспериментальной кривой $I=f(t)$ для проверки загрузки двигателя.

Полученные записи нескольких циклов работы позволяют произвести проверку загрузки двигателя аналогично рассмотренному выше. Так как в этих случаях форма кривой $I=f(t)$ произвольна, экспериментальные

зависимости необходимо обработать таким образом, чтобы можно было воспользоваться формулой (39). Поясним, как это можно сделать, с помощью примерной зависимости $I=f(t)$, представленной на рис. 25.

Экспериментальная кривая, показанная на этом рисунке жирной сплошной линией *1*, имеет сложную форму. Ее можно упростить, заменив ломаной, проходящей достаточно близко к действительной кривой, как это показано тонкой штриховой линией *2*. При этом сложная кривая заменяется на отдельных участках возрастающей или спадающей линейной зависимостью с различными наклонами, а на остальных — горизонтальными прямыми, соответствующими постоянным значениям тока. Каждый наклонный участок можно заменить равноценным в отношении выделяемого в двигателе тепла неизменным среднеквадратичным током $I_{эi}$, величина которого определяется по формуле

$$I_{эi} = \sqrt{\frac{I_{1i}^2 + I_{2i}^2 + I_{1i}I_{2i}}{3}},$$

где I_{1i} — ток в начале i-го участка; I_{2i} — ток в конце i-го участка; $i=1, 2, 3\ldots$ — порядковый номер участка.

В результате такой замены исходная кривая *1* заменяется ступенчатым графиком изменения тока *3*, показанным на рис. 25 жирной штриховой линией, который равноценен экспериментальной зависимости по выделяемому в двигателе теплу. Применение формулы (39) для определения среднеквадратичного тока нагрузки для полученного ступенчатого графика *3* не вызывает затруднений.

Недостатком самопишущего амперметра является относительно большая механическая инерция подвижной части прибора, дополнительно нагруженного пером, с помощью которого осуществляется фиксация показаний на бумаге. Вследствие инерции подвижная часть прибора не успевает следить за быстрыми изменениями измеряемого тока. Возникающая погрешность тем больше, чем быстрее меняется ток, поэтому, как уже указывалось, использовать самопишущий амперметр для экспериментальной проверки загрузки двигателя можно только в тех случаях, когда время цикла относительно велико, а нагрузка меняется плавно.

Этот метод неприменим для механизмов с большой частотой изменений нагрузки, таких как компрессоры, кузнечно-штамповочные машины, различные дробилки и т. п. Во всех подобных случаях запись кривых $I=f(t)$ должна производиться с помощью шлейфового осциллографа. Работа со шлейфовым осциллографом, а также обработка получаемых осциллограмм требуют специальной подготовки и опыта экспериментатора. В данной небольшой по объему книге осветить эти вопросы не представляется возможным.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Технические данные асинхронных двигателей единой серии (А и АО)

Тип двигателя	$P_н$, кВт	$n_н$, об/мин	$\frac{M_{макс}}{M_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$J_{дв}$, кг·м²	$t_{по}$, с	$t_{то}$, с	$\Delta A_{по}$, кВт·с	$\Delta A_{то}$, кВт·с
В защищенном исполнении (типов А и АЛ), 3000 об/мин (синхр.									
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
1500 об/мин (синхр.)									
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
1000 об/мин (синхр.)									
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	0,49	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
750 об/мин (синхр.)									
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

Тип двигателя	$P_н$, кВт	$n_н$, об/мин	$\frac{M_{макс}}{M_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$J_{дв}$, кг·м²	$t_{п0}$, с	$t_{т0}$, с	$\Delta A_{п0}$, кВт·с	$\Delta A_{т0}$, кВт·с
В закрытом обдуваемом исполнении (типов АО и АОЛ), 3000 об/мин (синхр.)									
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
1 500 об/мин (синхр.)									
31-4	0,6	1 410	2,0	1,7	0,0038	0,07	0,09	0,10	0,23
32-4	1,0	1 410	2,0	1,8	0,0053	0,06	0,07	0,14	0,30
41-4	1,7	1 420	2,0	1,8	0,012	0,08	0,10	0,33	0,77
42-4	2,8	1 420	2,0	1,9	0,017	0,07	0,08	0,5	1,13
51-4	4,5	1 440	2,0	1,4	0,05	0,15	0,20	1,7	3,7
52-4	7,0	1 440	2,0	1,5	0,07	0,13	0,17	2,5	5,7
62-4	10,0	1 460	2,3	1,3	0,15	0,19	0,30	5,4	11,0
63-4	14,0	1 460	2,3	1,4	0,19	0,17	0,25	7,4	14,5
72-4	20,0	1 460	2,3	1,3	0,38	0,24	0,38	10,6	21,6
1 000 об/мин (синхр.)									
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
750 об/мин (синхр.)									
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

а) Технические данные крановых асинхронных двигателей с контактными кольцами серии МТ и МТВ, 50 Гц, 220/380 и 500 В

Тип двигателя	Закрытые с внешним обдувом, *ПВ*=25%			$J_{дв}$, кг·м²
	$P_н$, кВт	$n_н$, об/мин	$M_{макс}/M_н$	
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
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 $ПВ25\%=$					Допустимое число пусков в час при работе вхолостую	$J_{дв}$, кг·м²
	$P_н$, кВт	$n_н$, об/мин	$M_{макс}/M_н$	$M_п/M_н$	$I_п/I_{1н}$		
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
МТК 011-6	1,4	840	2,6	2,6	3,1		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	Данных нет	0,28
МТКВ 312-8	11,0	680	3,0	2,8	4,3		0,39
МТКВ 411-8	16	585	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

Коэффициенты полезного действия механических передач и подшипников

Цилиндрическая зубчатая передача с прямыми зубьями:	
шлифованными	0,99
нарезанными	0,98
необработанными	0,96
с косыми зубьями	0,97—0,98
„ шевронными зубьями	0,985
Коническая зубчатая передача	0,97—0,98
Ременная передача	0,94—0,98
Клиноременная передача	0,8—0,98
Цепная передача	0,97
Полиспасты	0,92—0,97
Подшипник скольжения	0,94—0,98
шариковый	0,99

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сандлер А. С.** Электрооборудоваиие пронзводственных механизмов. М., Госэнергоиздат, 1958.

2. **Ильинский Н. Ф.** Расчет и выбор сопротивлений для электродвигателей. М, Госэнергоиздат, 1959.

3. Асинхронные электродвигатели единой серии А2 и АО2 мощностью от 0,6 до 100 кВт (каталог-справочник), 1969 (Информэлектро).

4. Электрические машины постоянного тока единой серии (каталог-справочник), 1964 (ВНИИЭМ).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

1. Основные виды и исполнения электрических двигателей 5
2. Нагреваннe и охлаждение двигателей 18
3. Номинальные данные двигателей 22
4. Краткие сведения об основных сериях электрических двигателей 30
5. Нагрузки двигателей. Понятие о перегрузочной способности 34
6. Выбор двигателей для механизмов длительного режима работы 47
7. Выбор двигателей для механизмов повторно-кратковременного и кратковременного режимов работы . . 60
8. Особенности выбора асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором 72
9. Экспериментальная проверка загрузки двигателей . . 80

Приложения 89

Список литературы 94

Владимир Иванович Ключев

Выбор электродвигателей для производственных механизмов

Редактор *Э. К. Биленко*
Обложка художника *В. И. Карпова*
Художественный редактор *Д. И. Чернышев*
Технический редактор *Л. Н. Никитина*
Корректор *З. Б. Драновская*

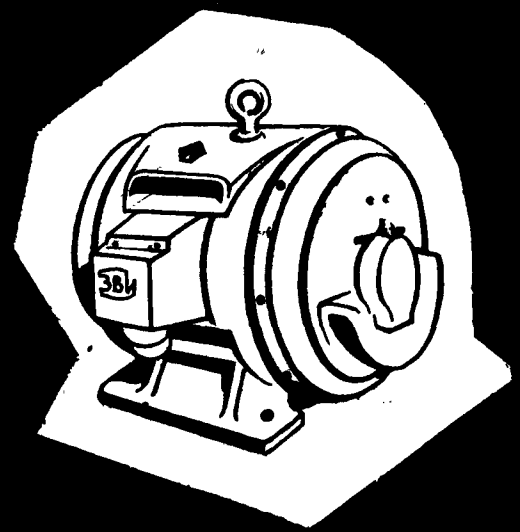
Сдано в набор 20/VIII 1973 г.
Подписано к печати 27/II 1974 г. Т-05514
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 5,04 Уч.-изд. л. 5,21
Тираж 20 000 экз. Зак. 383 Цена 19 коп.

Издательство «Энергия» Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Цена 19 коп.

Библиотека электромонтера



В. И. КЛЮЧЕВ

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ