

Ж. А. ЗАРАНДИЯ, А. В. КОБЕЛЕВ

ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ



**Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2026**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

Ж. А. ЗАРАНДИЯ, А. В. КОБЕЛЕВ

ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ

Утверждено Ученым советом
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся
по направлениям 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
и 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Учебное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2026

УДК 621.313(075.8)
ББК з261.2я733-342
3-34

Рецензенты:

Начальник Оперативно-ситуационного отдела Центра управления сетями
филиала ПАО «Россети-Центр»-«Тамбовэнерго»

А. А. Иванов

Доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Д. Ю. Муромцев

Зарандия, Ж. А.

- 3-34 Выбор типа электродвигателя для различных производственных задач [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ж. А. Зарандия, А. В. Кобелев. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2026. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium IV ; RAM 512 Mb ; необходимое место на HDD 1,6 Mb ; Windows 7/8/10/11 ; дисковод CD-ROM ; мышь. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-8265-3016-0

Включает в себя рекомендации по выбору типа электродвигателя в зависимости от рода тока, мощности, перегрузочной способности двигателя, типа нагрузки, режимов работы производственных механизмов и т.п. для решения конкретной производственной задачи с учетом специфических требований отрасли производства и условий эксплуатации. Приведены расчетные формулы, схемы, графики. Для закрепления теоретического материала предложены варианты заданий.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также направлениям подготовки бакалавров, изучающих раздел «Электрические машины» в рамках курса «Электротехника».

УДК 621.313(075.8)
ББК з261.2я733-342

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-3016-0

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2026

ВВЕДЕНИЕ

Электродвигатель – это электромеханическое устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую, предназначенное для приведения в движение станков, производственных механизмов, электротранспорта. Электродвигатель является основным элементом электропривода рабочих машин в различных областях промышленности и в быту.

Промышленное применение

- Станочное оборудование – токарные, фрезерные, сверлильные и другие металлообрабатывающие станки.
- Насосное оборудование – центробежные, поршневые, мембранные насосы для перекачивания различных жидкостей.
- Компрессорное оборудование – для производства сжатого воздуха и газов.
- Вентиляционное оборудование – вентиляторы, дымососы, системы кондиционирования.
- Конвейерные и транспортирующие системы – ленточные, цепные, роликовые конвейеры.
- Подъемно-транспортное оборудование – краны, лифты, подъемники, лебедки.
- Экструзионное оборудование – для переработки пластмасс и других материалов.

Специализированное применение

- Крановые электродвигатели – для механизмов подъема и перемещения грузов.
- Тельферные электродвигатели – для тельферов и талей различной грузоподъемности.
- Взрывозащищенные электродвигатели – для работы во взрывоопасных зонах.

- Электродвигатели со встроенным тормозом – для механизмов, требующих быстрой остановки.
- Электродвигатели с повышенной степенью защиты IP23 и выше – для работы в агрессивных средах.

Бытовое применение

- Бытовая техника – холодильники, стиральные машины, пылесосы, кухонные комбайны.
- Инструмент – дрели, шуруповерты, циркулярные пилы, шлифовальные машины.
- Климатическое оборудование – кондиционеры, вентиляторы, тепловые завесы.
- Садовая техника – газонокосилки, триммеры, насосы.

Выбор типа электродвигателя для конкретного применения зависит от требований к оборудованию и условий эксплуатации.

При выборе электродвигателя для каждого технологического процесса необходимо решить ряд взаимосвязанных вопросов: выбор типа привода (регулируемый или нерегулируемый), выбор типа электродвигателя (по роду тока и напряжению, его номинальной частоте вращения и способу соединения с производственной машиной или исполнительным механизмом), выбор электродвигателя по конструктивному исполнению, режиму работы, климатическим условиям, классу защиты корпуса двигателя, а также по экономическим показателям.

Помимо этого, при выборе электродвигателя для конкретного применения всегда необходимо учитывать специфические требования данной отрасли и условия эксплуатации. Например, для пищевой промышленности требуются двигатели из нержавеющей стали, а для химического производства – с защитой от агрессивных сред.

Подробнее эти и другие критерии выбора типа электродвигателя для различных производственных механизмов рассмотрены в данном пособии.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО РОДУ ТОКА

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

Двигатели постоянного тока могут иметь различный способ возбуждения: независимое, смешанное или последовательное. Свойства двигателей независимого, смешанного или последовательного возбуждения различны.

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

Важнейшим достоинством двигателя с независимым возбуждением является также возможность плавного регулирования скорости в широких пределах и без больших затрат мощности. Двигатель с независимым возбуждением находит широкое применение в наиболее ответственных случаях, когда требуются высокие регулировочные свойства привода.

Главная особенность двигателей последовательного возбуждения – прямая и жесткая зависимость скорости от нагрузки. Снижение нагрузки приводит к резкому росту частоты холостого хода, при котором двигатель может достичь критических скоростей, приводящих к разрушению якоря и других механических частей (это явление называют «разносом вращения», а ее увеличение – к такому же резкому падению). Наиболее опасным режимом является режим

холостого хода»). Для двигателя с последовательным возбуждением характерна повышенная перегрузочная способность по сравнению с двигателем независимого возбуждения. Данное свойство определяет сферу его применения:

- Транспорт: трамваи, троллейбусы, электровозы.
- Грузоподъемная техника: механизмы подъема на ответственных кранах.
- Иные области со схожими требованиями к устойчивости к перегрузкам.

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

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

По сравнению с двигателями постоянного тока, асинхронные электродвигатели обладают рядом эксплуатационных преимуществ: повышенная надежность, обусловленная простотой конструкции (отсутствие щеточно-коллекторного узла), более низкая стоимость и упрощенное техническое обслуживание. Ключевым достоинством является возможность прямого питания от стандартной трехфазной сети переменного тока без необходимости использования выпрямительных устройств для преобразования в постоянный ток.

Наиболее распространенным на промышленных предприятиях является асинхронный двигатель трехфазного тока с короткозамкнутым ротором. Этот двигатель при всей своей простоте обладает рядом специфических особенностей, прежде всего в отношении условий пуска, реверса и торможения. Эти особенности должны учитываться при выборе двигателя, поэтому им в последующем изложении уделено особое внимание.

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

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ

По мощности различают:

- Микромашины – их мощность может варьироваться от нескольких долей ватта до 500 Вт. Они могут производиться для двух родов тока – постоянного и переменного. Могут быть рассчитаны как на работу при нормальной (промышленной) частоте 50 Гц, так и при повышенной (от 400 до 2000 Гц).
- Электродвигатели малой мощности – от 0,5 до 10,0 кВт. Также могут изготавливаться для двух родов тока – постоянного и переменного нормальной и повышенной частоты.
- Электродвигатели средней мощности – от 10 кВт до нескольких сотен киловатт.
- Электродвигатели большой мощности – мощность данных машин больше нескольких сотен киловатт. Такие электродвигатели предназначены для работы на постоянном и переменном напряжении нормальной частоты. Исключение могут составлять электродвигатели специального назначения (авиация, флот) и другие.

1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

- До 300 об/мин – тихоходные.
- От 300 до 1500 об/мин – средней быстроходности.
- От 1500 до 6000 об/мин – быстроходные.
- Более 6000 об/мин – сверхбыстроходные.

Микромашины выпускают с частотой вращения вала от нескольких оборотов в минуту до 60 000 об/мин. Скорость вращения машин средней и большой мощности, как правило, не превышает 3000 об/мин.

1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ПРИНЦИПУ ДЕЙСТВИЯ

Асинхронные двигатели являются основным типом электродвигателей, работающих от трехфазной сети переменного тока. Они находят широкое применение в промышленности для привода станков, подъемно-транспортного оборудования, землеройной техники, а также компрессоров и вентиляторов. В системах автоматического управления используются специальные исполнения: одно- и двухфазные управляемые асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы и сельсины.

Синхронные двигатели преимущественно применяются в высокомошных электроприводах. Для задач автоматики используются синхронные машины малой мощности.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) применяются в электроприводах, требующих широкого диапазона регулирования скорости. К ключевым областям их использования относятся железнодорожный и морской транспорт, прокатное производство, грузоподъемные и землеройные машины, а также сложные металлорежущие станки. ДПТ также являются основным выбором при питании от источников постоянного тока, таких как аккумуляторные батареи.

1.5. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО СПОСОБУ МОНТАЖА

Согласно стандарту СЭВ, классификация электрических машин по их конструктивному исполнению определяется тремя ключевыми признаками:

1. Способ монтажа и крепления (например, на лапах, фланцем или комбинированный).
2. Направление оси вала (горизонтальное, вертикальное и т.д.).
3. Конструкция подшипниковых узлов (количество и тип подшипниковых щитов).

На основе комбинации этих признаков все электромашины делятся на девять конструктивных групп (обозначаемых цифрами от 1 до 9).

Каждая из них подразделяется на виды, состоящие из нескольких форм исполнения. Всем им присвоены соответствующие обозначения, которые содержат буквы IM (International Mountning) и четыре цифры: первая определяет конструктивную группу, вторая и третья – способ монтажа, четвертая (от 0 до 8) – форму конца вала. Имеются следующие конструктивные группы: IM1 – машина на лапах с подшипниковыми щитами; IM2 – на лапах с подшипниковыми щитами и фланцем на одном щите; IM3 – без лап с подшипниковыми щитами и фланцем на одном щите; IM4 – без лап с подшипниковыми щитами и фланцем на станине; IM5 – без подшипников; IM6 – с подшипниковыми щитами и стояковыми подшипниками; IM7 – со стояковыми подшипниками (без щитов); IM8 – с вертикальным валом (не охватываемые группами IM1 – IM4); IM9 – специальное исполнение. Концы валов электрических машин имеют стандартные размеры. Стандарты устанавливают строго фиксированные высоты осей вращения электрических машин, а также конструкции и размеры мест крепления.

1.6. КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Конструктивное исполнение электродвигателя определяется необходимостью обеспечения защиты от внешних факторов. Степень защиты обозначается в соответствии с международным стандартом системой обозначений IP (International Protection), состоящей из аббревиатуры IP и двух следующих за ней цифр.

Первая цифра (от 0 до 6) характеризует степень защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины и от попадания внутрь ее твердых посторонних предметов. Вторая цифра (от 0 до 8) характеризует степень защиты машины от проникновения в нее влаги.

Различают следующие виды исполнения электрических машин: открытое, защищенное, каплезащищенное, брызгозащищенное, водозащищенное, пылезащищенное, закрытое, герметичное, взрывозащищенное.

Открытое (IP00) – двигатель не имеет специальных приспособлений, предохраняющих от попадания внутрь посторонних предметов и случайного соприкосновения обслуживающего персонала с токопроводящими и вращающимися частями; машины открытого исполнения встречаются редко и лишь в устаревших конструкциях.

1.7. КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ

Кроме защиты от окружающей среды, указываются климатическое исполнение и категория размещения оборудования.

При эксплуатации ЭД в нормальных климатических условиях температура окружающей среды составляет 25...10 °С, относительная влажность воздуха 35...80% и атмосферное давление 84...106 кПа. В зависимости от макроклиматических условий предусмотрены различные климатические исполнения двигателей, которым присваиваются определенные обозначения. Электрические двигатели, предназначенные для эксплуатации на суше, реках и озерах в макроклиматических районах с умеренным климатом, имеют обозначение – У; с холодным – ХЛ; с влажным тропическим – ТВ; с сухим тропическим – ТС; с сухим и с влажным тропическим – Т; для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение) – О. Двигатели, предназначенные для установки на морских судах в макроклиматических районах с умеренно-холодным морским климатом, имеют обозначение М, с тропическим морским – ТМ; для неограниченного района плавания – ОМ; двигатели, предназначенные для всех макроклиматических районов на суше и на море, – В.

1.8. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО УСЛОВИЯМ РАЗМЕЩЕНИЯ

В зависимости от условий размещения предусмотрены различные исполнения ЭД, которым также присваиваются определенные обозначения. Двигатели, которые могут эксплуатироваться на открытом воздухе, имеют обозначение 1; в закрытом помещении, где температура и влажность воздуха несущественно отличаются от наружного воздуха, – 2; в закрытых помещениях, в которых и пыли на машину существенно меньше, чем на открытом воздухе, – 3; в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (например, в закрытых отапливаемых помещениях) – 4; в помещениях с повышенной влажностью (например, в неотапливаемых и неventилируемых подземных помещениях) – 5. Например, двигатели, которые могут работать в районах с холодным климатом при установке на открытом воздухе, имеют обозначение ХЛ1; в районах с умеренным климатом в закрытых помещениях – УЗ или У4.

В зависимости от климатического исполнения машины и условий ее размещения соответственно изменяют конструкцию ее корпуса, применяют различные уплотнения, усиливают изоляцию обмоток и осуществляют другие конструктивные меры, обеспечивающие нормальную эксплуатацию машины в течение установленного срока.

1.9. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ

Каждый ЭД рассчитан на определенный режим работы:

S1 – продолжительный режим.

S2 – кратковременный.

S3 – периодический кратковременный.

S4 – периодический кратковременный с пусками.

S5 – периодический кратковременный с торможением.

S6 – периодический непрерывный с кратковременной нагрузкой.

S7 – периодический непрерывный с электрическим торможением.

S8 – периодический непрерывный с одновременным изменением нагрузки и частоты вращения.

S9 – режим с непериодическим изменением частоты вращения и нагрузки.

1.10. НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Основой выбора электродвигателя являются его паспортные (номинальные) данные, указываемые заводом-изготовителем.

Номинальные данные двигателя характеризуют его основные энергетические показатели и условия работы, на которые он рассчитан. К номинальным данным относятся: мощность, напряжение, ток, частота вращения, частота переменного тока, коэффициент полезного действия (КПД), число фаз, коэффициент мощности и режим работы, класс изоляции, а также дополнительные данные, необходимые для монтажа и эксплуатации машины (масса, схема включения обмоток и др.).

Номинальной мощностью ЭД называют мощность, на которую рассчитан данный двигатель по условиям нагревания и безаварийной работы в течение установленного срока службы. Для электрических двигателей под номинальной мощностью понимают полезную механическую мощность на валу, выраженную в ваттах или киловаттах.

При нагрузках, меньших номинальной, снижается КПД и коэффициент мощности двигателя меньше номинальных значений. При нагрузках, больших

номинальной, появляется опасность чрезмерного повышения температуры частей электрической машины, в первую очередь ее обмоток, что может привести к преждевременному выходу из строя изоляции обмоток и, следовательно, всей машины.

Электрические двигатели выпускают на стандартные напряжения, согласованные со стандартными напряжениями электрических сетей.

Длительные отклонения по значению напряжения в сети, питающей электродвигатель, не должны превышать -5% и $+10\%$.

2. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

2.1. НАГРЕВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

При работе двигателя в нем возникают потери энергии (и мощности), что вызывает его нагрев.

Часть потребляемой электродвигателем мощности расходуется на нагрев его обмоток, нагрев магнитопровода от гистерезиса и вихревых токов, трение в подшипниках и трение о воздух. Потери на нагрев обмоток, пропорциональные квадрату тока, называют переменными ($\Delta P_{\text{пер}}$). Остальные потери в двигателе от его нагрузки зависят мало и их условно называют постоянными ($\Delta P_{\text{пост}}$).

Таким образом, общие потери в двигателе

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пер}} + \Delta P_{\text{пост}}.$$

Допустимый нагрев электродвигателя определяется материалом изоляция его обмотки.

Электроизоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, в зависимости от нагревостойкости подразделяют на семь классов: Y, A, E, B, F, H, C, характеристики которых приведены в табл. 2.1.

В настоящее время в основном применяют изоляцию классов B и F, а в специальных машинах, работающих в тяжелых условиях (металлургия, горное оборудование, транспорт), – класса H.

2.1. Допустимый нагрев, в °C

Y	A	E	B	F	H	C
90	105	120	130	155	180	200

При одной и той же нагрузке электродвигателя нагрев его будет неодинаковым при разных температурах окружающей среды. Расчетная температура t_0 окружающей среды равна $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этой температуре определяют значения номинальной мощности электродвигателей.

Превышение температуры электродвигателя над температурой окружающей среды называют перегревом:

$$\tau = t - t_0.$$

Обычно считают, что тепло, отдаваемое электродвигателем в окружающую среду, пропорционально перегреву.

При работе в электродвигателе за время dt выделяется теплота dq . Часть этой теплоты dq_1 поглощается массой электродвигателя, вследствие чего повышаются температура t и перегрев τ двигателя. Остальная теплота dq_2 выделяется двигателем в окружающую среду.

По мере повышения температуры электродвигателя возрастает тепло dq_2 . При некотором значении перегрева окружающей среде будет отдаваться столько тепла, сколько ее выделяется в электродвигателе; тогда $dq = dq_2$ и $dq_1 = 0$. Температура электродвигателя перестает повышаться, и перегрев достигает установившегося значения $\tau_{\text{уст}}$.

При указанных выше допущениях можно записать:

$$Qdt = Cdt + A\tau dt,$$

где Q – тепловая мощность, обусловленная потерями в электродвигателе, Дж/с; A – теплоотдача двигателя, т.е. количество теплоты, выделяемое двигателем в окружающую среду в единицу времени при разности температур двигателя и окружающей среды в $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, Дж/(с· $^{\circ}\text{C}$); C – теплоемкость двигателя, т.е. количество теплоты, необходимое для повышения температуры двигателя на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, Дж/ $^{\circ}\text{C}$.

После преобразований и решая уравнение относительно τ , получим **уравнение нагрева электродвигателя:**

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{\frac{-t}{C/A}} \right) + \tau_0 e^{\frac{-t}{C/A}}.$$

Величину $C/A = T$, имеющую размерность времени, называют **постоянной времени нагрева** электродвигателя. В соответствии с этим обозначением уравнение нагрева может быть переписано в виде

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-t/T} \right) + \tau_0 e^{-t/T}.$$

По мере увеличения температуры отдача тепла в окружающую среду значительно увеличивается, а рост температуры внутри ЭД замедляется.

При некотором превышении установившейся температуры $\tau_{уст}$, все выделяющееся за счет потерь тепло будет полностью отдаваться в окружающую среду и дальнейший рост температуры прекратиться (рис. 2.1, кривая 1). Установившееся превышение температуры можно определить по выражению:

$$\tau_{уст} = \frac{0,24\Delta P}{A}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Как видно из этого выражения, температура нагрева двигателя будет тем выше, чем меньше теплоотдача A . Поэтому при выборе двигателя необходимо учитывать условия его охлаждения.

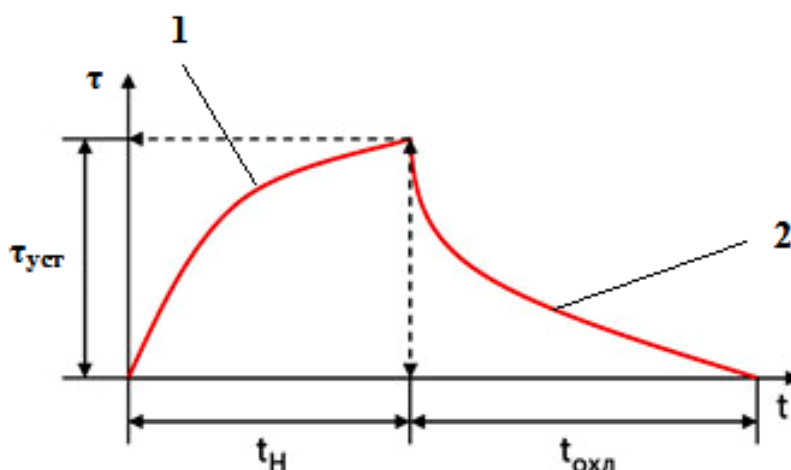


Рис. 2.1. Кривые нагрева (1) и охлаждения (2) электродвигателей

2.2. ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Способ охлаждения зависит от вида исполнения машины и ее мощности. При повышении мощности ЭД требуется увеличивать интенсивность ее охлаждения.

Электрические микромашины обычно не имеют искусственного охлаждения.

ЭД малой, средней и большой мощности выполняют с искусственным охлаждением.

Обозначение способов охлаждения состоит из букв IC (International Cooling) и двух цифр: первая (от 0 до 6) условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая (от 0 до 7) – способ его перемещения.

По способу охлаждения различаются:

1) ЭД с естественным охлаждением, в которых нет никаких специальных приспособлений для охлаждения;

2) ЭД с внутренней самовентиляцией, охлаждение которых происходит с помощью вентиляторов или других вентиляционных устройств, укрепленных на вращающихся частях самой вентилируемой машины и осуществляющих вентиляцию внутренних ее полостей (открытые и защищенные машины);

3) ЭД с наружной вентиляцией, в которых путем самовентиляции охлаждается внешняя поверхность машины, а внутренние ее части закрыты для доступа внешнего воздуха (закрытые машины);

4) ЭД с независимым охлаждением, в которые охлаждающая газообразная или жидкая среда подается с помощью отдельного вентилятора, компрессора или насоса, имеющего собственный привод.

Для охлаждения двигателей с регулируемой частотой вращения самовентиляции может быть недостаточно, так как при низких оборотах интенсивность охлаждения также снизится.

Проблема с охлаждением двигателя на пониженных оборотах решается тремя способами:

- запуск устройства в этом режиме работы только в том случае, если у него хватает мощности;
- искусственное уменьшение нагрузки;
- использование дополнительных систем, которые будут охлаждать двигатель в принудительном порядке.

Наиболее распространенным является третий способ, при котором вне зависимости от режима работы двигатель будет получать необходимое охлаждение.

Большинство современных электродвигателей устроены таким образом, что им не требуется дополнительная система охлаждения, если скорость вращения отличается от номинальной менее чем на 20%. В рамках допустимого отклонения встроенный вентилятор будет без проблем справляться возложенными на него задачами. Однако при изменении скорости более чем на 20% воздушного потока будет не хватать. Это следует помнить специалистам, занимающимся обслуживанием электрического двигателя.

Использование дополнительных систем охлаждения может потребоваться не только при снижении скорости вращения, но и при возрастании мощности. В такой ситуации мощности встроенного вентилятора будет недостаточно. Также дополнительные системы используются при резких и частых запусках, во время эксплуатации в неблагоприятных окружающих условиях: высокая температура в помещении, разреженность воздуха и т.д. В таких случаях специалисты должны пристально следить за установкой и выявлять любые отклонения в ее работе. Это позволит избежать поломок и продлить срок службы двигателя.

Для повышения уровня защиты установки от перегрева рекомендуется использовать внешние термодатчики. Приборы устанавливаются на двигатель и другие компоненты и замеряют их температуру. Это помогает обслуживаю-

щему персоналу быстро принять необходимые меры, если температура начинает отклоняться от нормы и приближается к критическому значению.

Температура электродвигателя зависит от максимальной величины нагрузки на вал. Большая нагрузка способствует выделению избыточного количества тепла. После отключения электромотор постепенно охлаждается.

2.3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

Общие технические требования

Электрические машины должны иметь высокую надежность работы, хорошие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), по возможности минимальные габаритно-установочные размеры, массу и стоимость: они должны быть простыми по конструкции, несложными в изготовлении и удобными в обслуживании и эксплуатации.

Каждая электрическая машина рассчитана на работу при вполне определенных условиях эксплуатации в течение установленного срока службы.

Надежность работы машины обеспечивается достаточными запасами при проектировании, применением высококачественной технологии изготовления и правильной эксплуатацией.

При проектировании должны быть обеспечены:

1) механическая прочность всех элементов электродвигателя, он должен без повреждений и деформаций выдерживать кратковременные перегрузки по току и кратковременные превышения номинальной частоты вращения;

2) электрическая прочность изоляции обмоток не должна терять своих качеств при длительной эксплуатации машины и выдерживать повышенное по сравнению с номинальным испытательное напряжение;

3) достаточное охлаждение магнитопровода, скользящих контактов, обмоток, подшипников.

Максимальные температуры всех частей машины не должны превышать нормированных значений. Для этого необходимо соблюдать ряд правил:

1) выбор электромагнитных нагрузок (плотности тока в обмотках и индукции в элементах магнитопровода), при которых выделяемая в обмотках и магнитопроводе теплота успевает отводиться из машины системой ее охлаждения и не вызывает недопустимого нагрева машины;

2) применение в машинах постоянного тока добавочных полюсов и компенсационной обмотки, выбор соответствующих марок щеток, которые предотвращают недопустимое искрение на коллекторе при номинальной нагрузке.

2.4. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Понятие энергоэффективность означает оптимальное использование энергии, благодаря которому достигается снижение ее потребления.

Энергоэффективность электродвигателей – это способность двигателя преобразовывать электрическую энергию в механическую с минимальными потерями, что выражается через его КПД.

В зависимости от этого двигатели классифицируются по международному стандарту IEC (International Electrotechnical Commission) на классы: IE1 (стандартный), IE2 (высокий), IE3 (сверхвысокий) и IE4 (премиум), где более высокий класс означает меньшие потери энергии и более высокую энергоэффективность. КПД двигателя зависит от его мощности (рис. 2.2).

Основные потери энергии в двигателях условно разделяют на:

- механические потери (возникают от трения, возникшего в динамических частях двигателя);
- магнитные потери (например, из-за токов Фуко);
- электрические потери (потери в стали при протекании тока).

Электродвигатели IE1 чаще всего применяются там, где наиважнейшим критерием служит дешевизна, простота конструкции (как следствие – простота ремонта) и доступность готового оборудования.

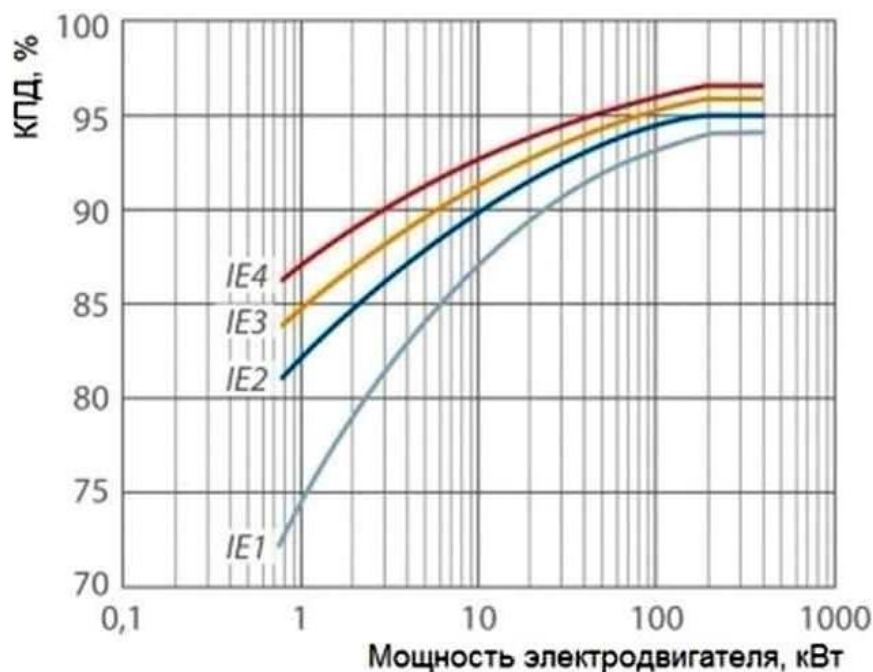


Рис. 2.2. Зависимости КПД двигателя от его мощности:

IE1 – стандартный тип; IE2 – высокая группа эффективности;

IE3 – сверхвысокий класс; IE4 – премиум класс

Электродвигатели IE2 применяют, когда необходима более тонкая настройка оборудования для работы его в оптимальном режиме. Данный класс электродвигателей более эффективен, в них используются менее мощные и, как следствие, менее шумные вентиляторы. На рисунке 2.2 видны преимущества данного класса по сравнению с IE1.

В последние несколько лет появились двигатели класса IE3, способные работать даже при длительных перегрузках в диапазоне 10...15%.

В электродвигателях класса IE4 используются уникальные системы аэродинамики, теплообмена и конструкции – повышенное содержание активных материалов, максимальное уменьшение воздушного зазора, сверхточная соосность всех центров машины. Внедрение таких двигателей существенно снижает энергозатраты производства.

Таким образом, можно сделать вывод, что внедрение в производство энергоэффективных двигателей приводит к снижению потерь мощности, и, как следствие, к экономии электроэнергии, а также к снижению эксплуатационных затрат.

3. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. ФОРМИРОВАНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Производственные машины и механизмы приводятся в движение с помощью электрического привода, основным элементом которого является электродвигатель.

Величины, характеризующие движение рабочих органов производственных машин, изменяются при воздействии сил F на их кинематическую цепь.

Для вращательного движения физическим аналогом силы F является момент M .

Момент создается силой, приложенной к плечу, например к радиусу барабана грузоподъемной лебедки (рис. 3.1, а); или парой сил, возникающих в электродвигателях вращательного движения (рис. 3.1, б) $M = FR$.

Электрический двигатель вращательного движения является источником момента. Знаки моментов, прикладываемых к механической части электропривода, нужно соотносить со знаком скорости вращения. Например, скорость движения в направлении «вперед» будет иметь знак (+), а скорость движения в направлении «назад» – знак (–). Также поступают при определении знака скорости линейного движения, например линейного двигателя.

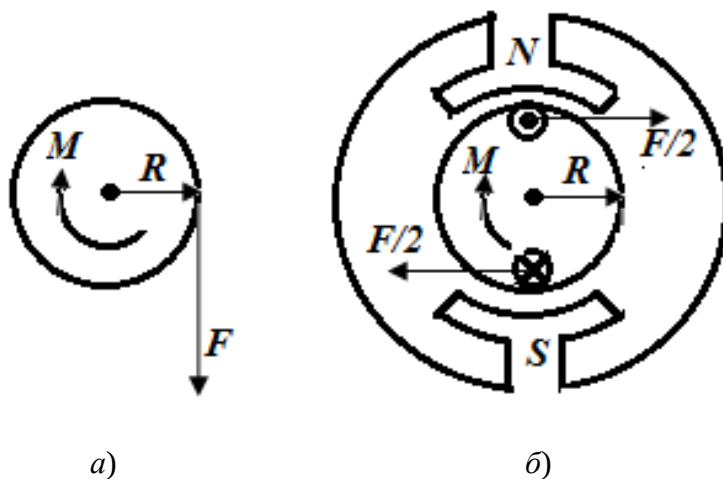


Рис. 3.1. Формирование вращающего момента

К механической системе, совершающей вращательное движение относительно фиксированной оси вращения, прикладываются два момента: момент M , развиваемый двигателем, и момент сопротивления движению M_c (рис. 3.2).

Если момент, развиваемый электродвигателем, равен моменту сопротивления движению, $M = M_c$ или $M - M_c = 0$, то механическая система будет совершать движение с постоянной (установившейся) угловой скоростью или находиться в состоянии покоя ($\omega = 0$).

Если момент, развиваемый электродвигателем, не равен моменту сопротивления движению, то уравнение движения имеет вид

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.1)$$

В этом уравнении все моменты приложены к валу двигателя, а момент инерции J_{Σ} отражает инерционности всех масс, связанных с валом электродвигателя и совершающих вместе с ним механическое движение.

Для поступательного движения уравнение движения электропривода соответственно будет иметь вид

$$F - F_c = m \frac{dV}{dt}, \quad (3.2)$$

где F – усилие, развиваемое двигателем; F_c – усилие сопротивления движению на штоке этого двигателя; m – массы подвижных элементов, связанные со штоком двигателя; $V = \omega R$ – линейная скорость штока двигателя.

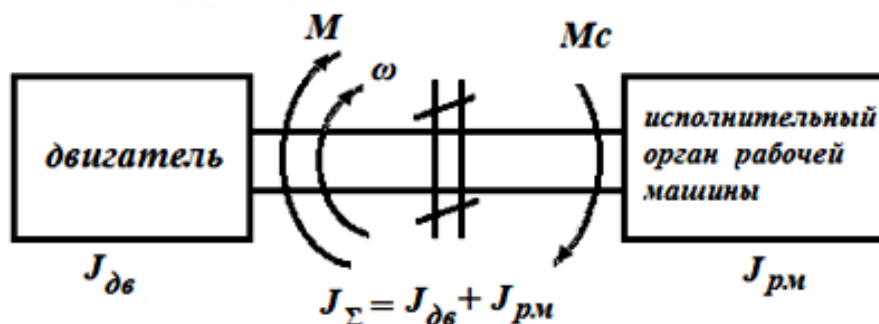


Рис. 3.2. Моменты, прикладываемые к механической системе с одной фиксированной осью вращения

3.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Зависимость скорости (частоты) вращения двигателя от момента, развиваемого двигателем, $\omega = f(M)$, называется механической характеристикой электродвигателя.

Вид механической характеристики определяется ее жесткостью β (рис. 3.3).

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.3)$$

Если механическая характеристика прямолинейна (1), то ее жесткость – величина постоянная и равная тангенсу угла наклона характеристики к оси ординат; если характеристика криволинейна (2), то жесткость определяется тангенсом угла наклона касательной к механической характеристике в данной точке (например, в точке A).

Жесткость механической характеристики отражает способность двигателя воспринимать приложенную нагрузку (момент) на его валу.

Обычно с увеличением момента нагрузки скорость уменьшается, поэтому, как правило, жесткость является величиной отрицательной.

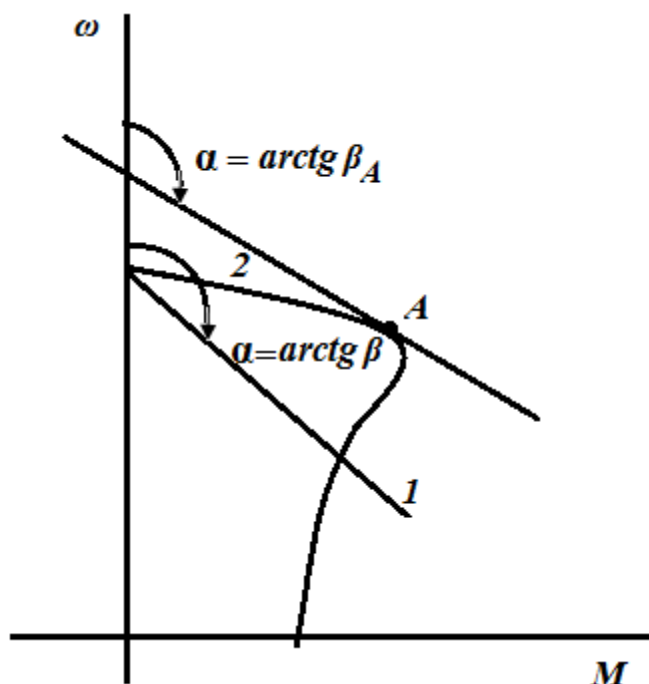


Рис. 3.3. Определение жесткости механических характеристик

На рисунке 3.4 показаны естественные механические характеристики основных видов электродвигателей вращательного движения.

Различают естественные и искусственные механические характеристики.

Естественные механические характеристики соответствуют параметрам двигателя и отсутствию в цепях обмоток двигателя дополнительных элементов.

Искусственные (или регулировочные) механические характеристики получают при изменении величины питающего напряжения или введении в цепь обмоток дополнительных элементов в целях регулирования скорости вращения двигателя.

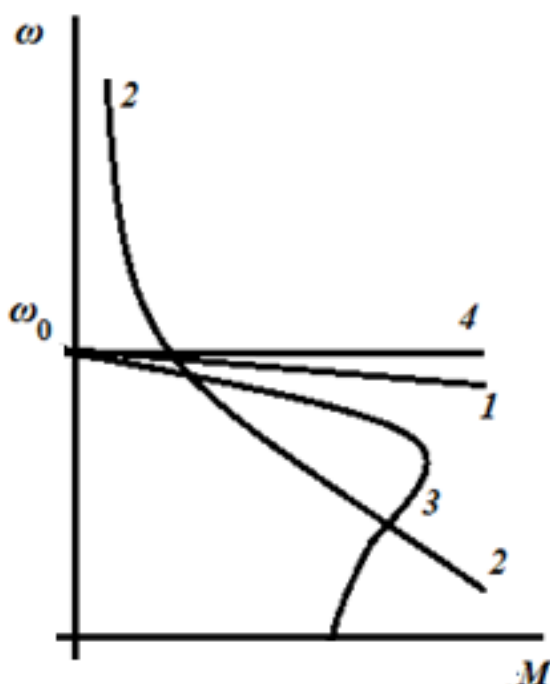


Рис. 3.4. Естественные механические характеристики двигателей:

1 – механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения; она имеет высокую жесткость, постоянную во всех точках;

2 – механическая характеристика двигателя постоянного тока последовательного возбуждения; жесткость этой характеристики непостоянна, она мала при малых нагрузках и повышается по мере возрастания момента;

3 – механическая характеристика асинхронного двигателя; она имеет две явно выраженные части: рабочую – с высокой постоянной отрицательной жесткостью и криволинейную часть с переменной положительной жесткостью; вторая часть характеристики используется только во время пуска двигателя;

4 – механическая характеристика синхронного двигателя; этот двигатель имеет абсолютно жесткую механическую характеристику, параллельную оси абсцисс

3.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧИХ МАШИН

Момент сопротивления движению M , создаваемый на рабочем органе производственной машины, также может являться функцией скорости.

Зависимость момента сопротивления на валу рабочей машины от скорости $M = f(\omega)$ (M_c и ω приведены к валу двигателя) называют механической характеристикой рабочей машины.

На рисунке 3.5 показаны механические характеристики некоторых рабочих машин.

Характеристика 1 соответствует машинам с рабочим органом резания; если толщина снимаемого резцом слоя постоянна, то момент сопротивления такой машины не зависит от скорости.

Характеристика 2 отвечает условиям работы машин, где момент сопротивления определяется главным образом силами трения (транспортёры, конвейеры и другие машины). В этом случае момент сопротивления также не зависит от скорости механизма, однако при пуске механизма момент, создаваемый силами трения покоя, может существенно превышать момент сил трения при движении.

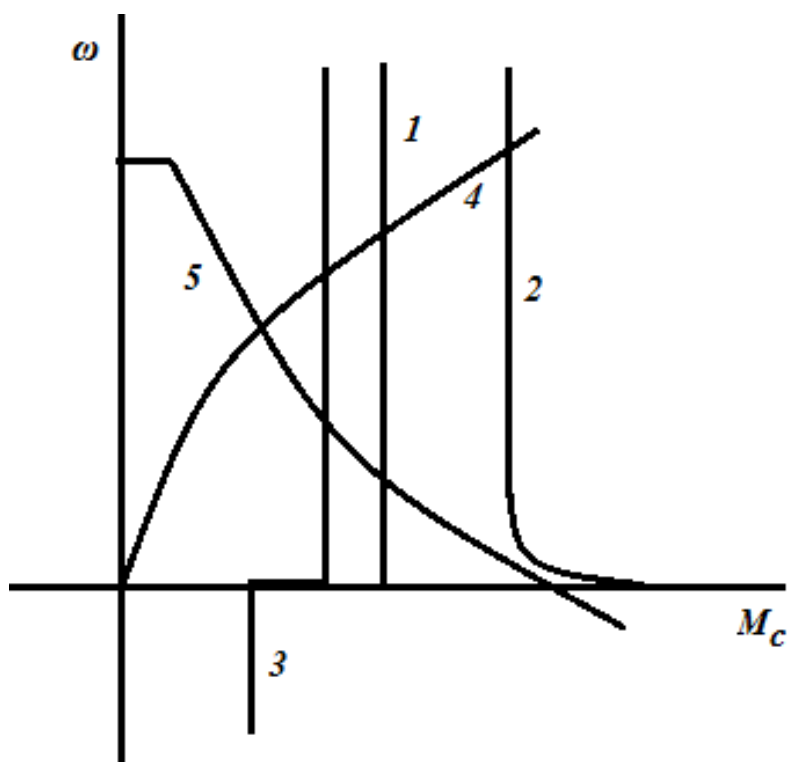


Рис. 3.5. Механические характеристики рабочих машин

Характеристика 3 относится к грузоподъемным механизмам, где момент сопротивления движению создается главным образом силой тяжести. Особенностью данной характеристики является то, что момент при подъеме груза несколько превышает момент сопротивления при спуске груза (характеристика 3), что связано с учетом механических потерь в передачах.

Характеристика 4 соответствует работе центробежных насосов, вентиляторов и компрессоров.

Характеристикой 5, близкой к гиперболе, обладают намоточные устройства и другие машины, для которых технологически необходима работа с постоянством мощности.

3.4. ГРАФИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ

Зная вид механической характеристики двигателя и рабочей машины, можно графическим путем определить скорость установившегося режима работы механизма.

Рисунок 3.6, а соответствует механической системе, состоящей из вентилятора и асинхронного двигателя. Точка А пересечения механических характеристик двигателя и вентилятора соответствует установившемуся режиму работы.

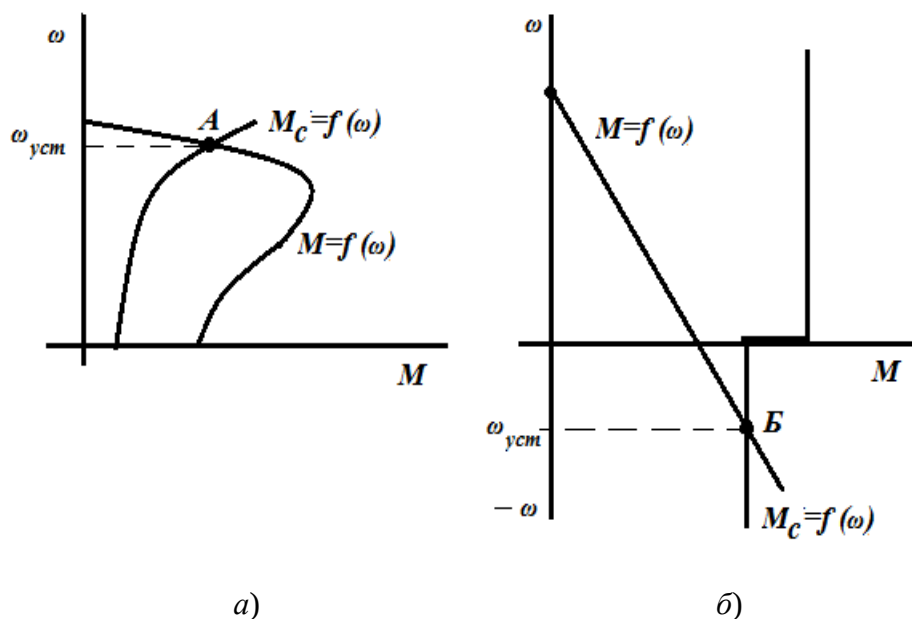


Рис. 3.6. Графическое определение скорости
установившегося режима движения электропривода

На рисунке 3.6, б показаны механические характеристики грузоподъемной лебедки, работающей в режиме спуска груза (скорость отрицательна). Для обеспечения постоянной скорости спуска приводной электродвигатель переводится в режим торможения противовключением. Точка *Б* пересечения этой характеристики с механической характеристикой лебедки соответствует равенству моментов $M = M_c$, т.е. установившемуся режиму движения.

3.5. ПРИВЕДЕННОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ЗВЕНО

Если рабочий орган машины непосредственно связан с валом электродвигателя, то для анализа движения электромеханической системы: двигатель – рабочий орган, можно пользоваться уравнением (3.1). Такая кинематическая схема характерна, например, для вентиляторов, насосов и ряда других машин. Однако во многих случаях рабочий орган машины связан с валом электродвигателя через систему передач (редукторы). В этом случае непосредственное использование уравнения (3.1) невозможно, так как моменты M и M_c приложены к разным валам, а инерционные массы вращаются с разными скоростями.

Для возможности использования уравнения движения возникает задача приведения всех моментов сопротивления и моментов инерции отдельных кинематических звеньев к одному валу, обычно к валу электродвигателя. Такое приведение является только расчетной операцией.

Принцип приведения моментов заключается в сохранении равенства мощностей. Приведение моментов инерции производится на основе принципа сохранения кинетической энергии.

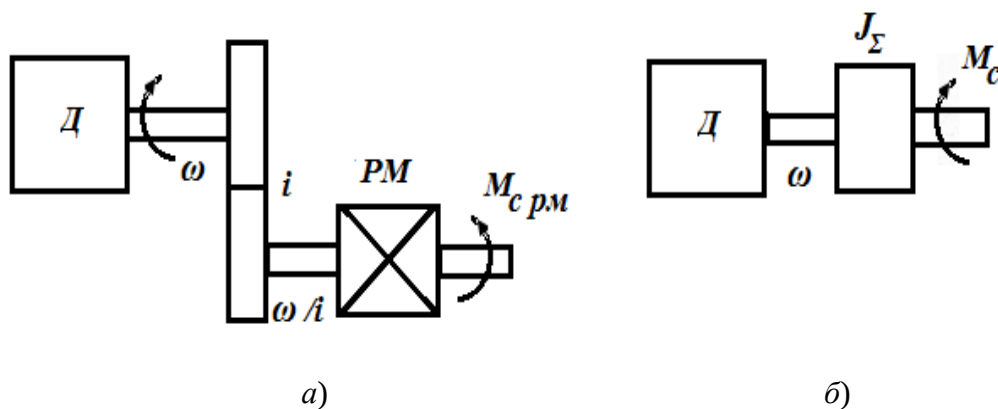


Рис. 3.7. Приведение моментов сопротивления и инерции к валу двигателя

Если исполнительный орган рабочей машины (РМ) соединяется с валом двигателя (Д) через редуктор с передаточным числом i (см. рис. 3.7, *a*), то для того, чтобы привести момент сопротивления $M_{с.рм}$, реально прикладываемый к рабочему органу, к валу двигателя, нужно соблюсти условие равенства мощностей:

$$M_{с.рм} \omega_{рм} = M_c \omega, \quad (3.4)$$

где $M_{с.рм}$ – момент сопротивления движению (далее будем называть его статический момент); $\omega_{рм}$ – угловая скорость исполнительного органа рабочего; M_c – момент сопротивления, приведенный к валу электродвигателя; ω – скорость вала двигателя.

Если учитывать потери в редукторе, то в уравнение (3.4) вводится КПД передачи $\eta_{ред}$:

$$M_{с.рм} \omega_{рм} = M_c \omega \eta_{ред}. \quad (3.5)$$

Следовательно, если известен статический момент на валу рабочего органа, статический момент, приведенный к валу двигателя, находится по формуле

$$M_c = \frac{M_{с.рм}}{(\omega/\omega_{рм})\eta_{ред}} = \frac{M_{с.рм}}{i\eta_{ред}}. \quad (3.6)$$

Для приведения момента инерции рабочего органа J к валу двигателя нужно соблюсти равенство кинетических энергий:

$$\frac{J_{рм} \omega_{рм}^2}{2} = \frac{J_{рм.пр} \omega^2}{2}. \quad (3.7)$$

Следовательно, приведенный к валу двигателя момент инерции рабочего органа находится по формуле

$$J_{рм.пр} = \frac{J_{рм}}{i^2}. \quad (3.8)$$

В некоторых кинематических схемах рабочих машин присутствуют звенья с поступательным движением. Рассмотрим такой случай на примере кинематической схемы грузоподъемной лебедки (рис. 3.8).

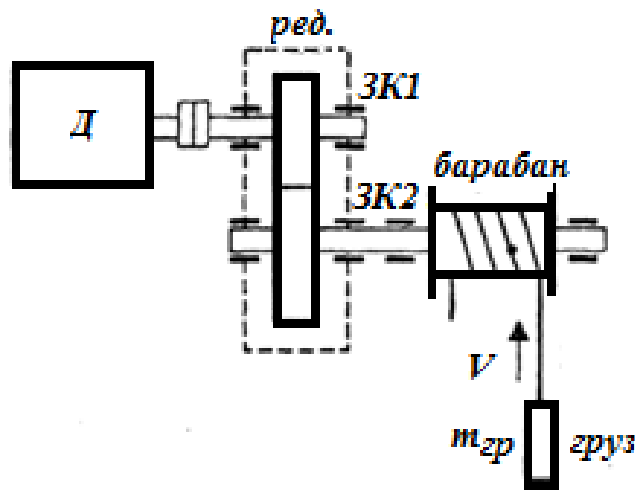


Рис. 3.8. Кинематическая схема грузоподъемной лебедки

Статический момент (активный) создается силой тяжести груза $G = m_{\text{гр}} g$ на крюке лебедки. Этот момент прикладывается к валу барабана лебедки и равен

$$M_{\text{с (бар)}} = m_{\text{гр}} g R_{\text{бар}}. \quad (3.9)$$

Для того чтобы привести статический момент к валу двигателя, для случая подъема груза нужно воспользоваться формулой

$$M_{\text{с}} = \frac{M_{\text{с.рм}}}{i \eta_{\text{ред}}} = \frac{m_{\text{гр}} g R_{\text{бар}}}{i \eta_{\text{ред}}}. \quad (3.10)$$

В данном случае приведенный статический момент для режимов подъема и спуска груза будет различным. При подъеме груза двигатель должен преодолевать сопротивление трения (потери мощности) в редукторе и других элементах, поэтому приведенный к валу двигателя статический момент будет несколько больше, что учитывается делением на КПД передачи. При спуске груза, когда движение механической системы совершается под действием активного статического момента, приведенный к валу двигателя момент будет несколько меньше, так как силы трения действуют согласно с тормозным моментом двигателя. Поэтому при спуске груза КПД передачи следует вводить в числитель формулы (3.10):

$$M_{\text{с}} = \frac{M_{\text{с.рм}}}{i} \eta_{\text{ред}}. \quad (3.11)$$

По общности выполняемых операций и принципу действия рабочие машины можно объединить в следующие группы:

- турбомеханизмы: насосы, вентиляторы, турбокомпрессоры;
- грузоподъемные машины: краны, лифты, подъемники и др.;
- транспортные машины: конвейеры, эскалаторы и др.;
- металлообрабатывающие станки;
- машины возвратно-поступательного движения: прессы, поршневые насосы и компрессоры;
- экскаваторы;
- прокатные станы.

3.6. ВЫБОР РЕДУКТОРА

Редуктор – механическое устройство, предназначенное для передачи и преобразования крутящего момента с изменением частоты вращения. Правильный выбор редуктора для электродвигателя критически важен для оптимальной работы всей приводной системы.

В таблице 3.1 приведены основные типы редукторов.

Таблица 3.1

Тип редуктора	Передаточное число	КПД	Достоинства
Цилиндрический	До 8:1 (одноступенчатый) До 40:1 (многоступенчатый)	0,94...0,98	Высокий КПД, компактность
Конический	До 6:1	0,93...0,97	Передача под углом 90°
Червячный	До 100:1	0,70...0,85	Высокое передаточное число, плавность хода
Планетарный	До 1000:1	0,90...0,95	Компактность, высокий крутящий момент
Волновой	До 300:1	0,8...0,9	Высокое передаточное число, точность

Алгоритм подбора редуктора

1. Определение требуемой выходной скорости:

$$\omega_{\text{ВЫХ}} = \omega_{\text{ДВ}} / i,$$

где i – передаточное число редуктора.

2. Расчет необходимого крутящего момента:

$$M_{\text{ВЫХ}} = (P / \omega_{\text{ВЫХ}}) \cdot 10^3,$$

где P – мощность кВт; $\omega_{\text{ВЫХ}}$ – выходная скорость, с^{-1} .

3. Выбор типа редуктора в зависимости от условий эксплуатации и требуемых параметров.

4. Проверка на соответствие механическим нагрузкам (радиальные и осевые усилия на валах).

5. Учет условий эксплуатации (температура, запыленность, влажность, вибрации).

6. Выбор способа монтажа и соединения с электродвигателем.

4. НОМИНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

4.1. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Режимы работы электродвигателей – это определенный порядок чередования периодов, который характеризуется:

- продолжительностью и величиной нагрузки;
- условиями охлаждения;
- частотой пуска, отключений и реверса;
- соотношениями потерь в периоды установившегося движения и пуска.

Существуют три основных (продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный) и пять дополнительных режимов работы, условно маркированных согласно международной классификации S1 – S8.

Рассмотрим основные режимы работы.

Продолжительный режим (S1) предусматривает длительный и непрерывный рабочий период, во время которого двигатель нагревается до установившейся температуры (рис. 4.1). Он может быть двух видов:

- Режим с постоянной нагрузкой (без изменения температуры в период работы). В нем функционируют двигатели конвейеров, электроприводы вентиляторов и насосов.
- Режим с изменяющейся нагрузкой (температура поднимается или падает с изменением нагрузки). Он используется при работе металлорежущих, деревообрабатывающих и прокатных станков.

Кратковременный режим работы электродвигателя (S2) характеризуется непродолжительным рабочим периодом (по стандартам 10, 30, 60, 90 мин) без нагрева двигателя до установившейся температуры с последующим его охлаждением во время паузы до температуры окружающей среды (рис. 4.2).

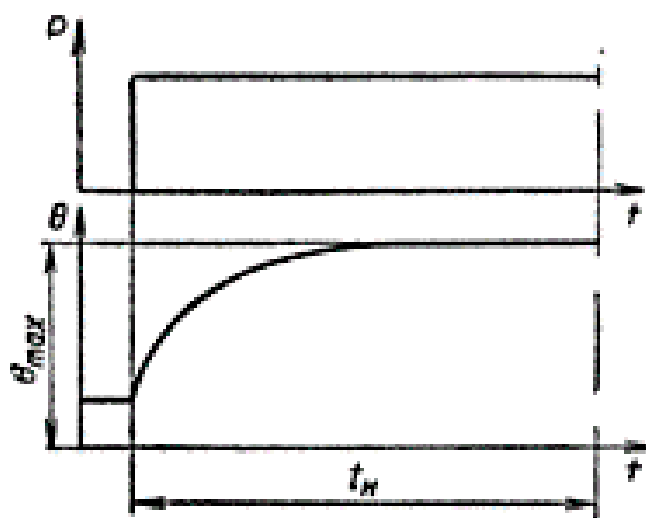


Рис. 4.1. Продолжительный режим работы электродвигателя S1

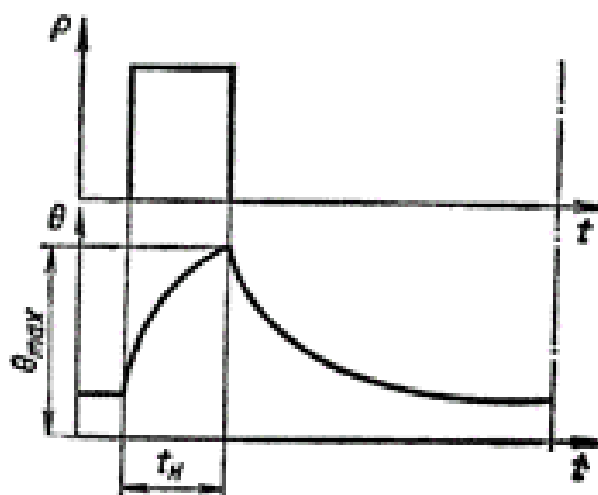


Рис. 4.2. Кратковременный режим работы электродвигателя S2

В этом режиме действуют электроприводы запорных устройств (вентилей, шлюзов, заслонок и т.д.). В паспорте двигателя указывается продолжительность рабочего периода (например, S2 – 60 мин).

Повторно-кратковременный режим работы электродвигателя (S3) – режим, при котором в течение рабочего периода нагрев двигателя не достигает установившейся температуры, а во время паузы не происходит охлаждения до температуры окружающей среды. Он характеризуется непрерывным чередованием периодов работы под нагрузкой и вхолостую (рис. 4.3). Так функционируют электроприводы подъемных кранов, экскаваторов и лифтов, т.е. устройств, действующих циклично.

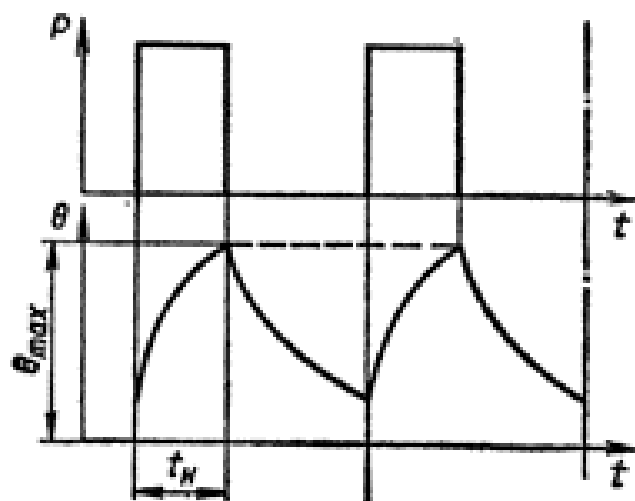


Рис. 4.3. Повторно-кратковременный режим работы электродвигателя S3

В этом режиме цикл работы таков, что пусковой ток не оказывает заметного влияния на превышение температуры. Продолжительность цикла недостаточна для достижения теплового равновесия и не превышает 10 мин. Рассматриваемый режим характеризуется показателем ПВ (продолжительность включения), который равен отношению продолжительности рабочего периода к продолжительности цикла (рабочего периода и остановок).

Продолжительность включения

$$\text{ПВ}_p = \frac{\Sigma t_p}{\Sigma t_p + \Sigma t_o} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

где Σt_p , Σt_o – сумма времени соответственно работы и пауз, если в цикле несколько операций.

Нормируемые значения продолжительности включения: 15, 25, 40, 60%, или относительные значения продолжительности рабочего периода: 0,15; 0,25; 0,40; 0,60.

Если расчетная ПВ (%) не соответствует стандартной, то эквивалентную мощность при выборе двигателя рассчитывают по формуле

$$P_{\text{э.ст}} = P_{\text{э.р}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_p}{\text{ПВ}_{\text{ст}}}}. \quad (4.2)$$

где $\text{ПВ}_{\text{ст}}$ – стандартная продолжительность включения.

Для режима S3 номинальные данные соответствуют только определенному значению ПВ и относятся к рабочему периоду.

Учет режима работы имеет большое значение при подборе двигателя. Мощности двигателей, указанные в каталогах, приведены для режима S1 и нормальных условий работы, кроме двигателей с повышенным скольжением.

Если двигатель работает в режиме S2 или S3, он нагревается меньше, чем в режиме S1, и поэтому он допускает большую мощность на валу.

При работе в режиме S2 допустимая мощность может быть повышена на 50% при длительности нагружения 10 мин, на 25% – при длительности нагружения 30 мин, на 10% – при длительности нагружения 90 мин.

Для режима S3 рекомендуются двигатели с повышенным скольжением.

4.2. МЕТОДЫ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ВЕЛИЧИН

При выборе двигателя для работы в режиме S3 часто применяют методы эквивалентных величин.

Метод эквивалентного тока

Потери в двигателях примерно пропорциональны току в квадрате. Зная график тока, протекающего по обмоткам двигателя, можно определить для каждого конкретного режима работы значение эквивалентного тока $I_{\text{ЭКВ}}$, характеризующее его нагрев.

Эквивалентный ток $I_{\text{ЭКВ}}$ – это такой ток с постоянным значением, который вызывает такой же нагрев электродвигателя, как и реально протекающий с изменяющимся значением в соответствии с графиком нагрузки механизма.

Эквивалентный ток

$$I_{\text{э}} = \sqrt{1/t_{\text{ц}} \int_0^t i^2 dt} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}, \quad (4.3)$$

где $t_{\text{ц}}$ – время цикла; $I_1, I_2, \dots, I_n$ – ток соответственно в течение времени $t_1, t_2, \dots, t_n$.

Условие проверки двигателя на нагрев: $I_{\text{э}} \leq I_{\text{н}}$, где $I_{\text{н}}$ – номинальный ток двигателя.

Метод эквивалентного тока дает достаточно достоверные результаты, если сохраняется постоянство сопротивлений двигателя и потерь в стали независимо от нагрузки.

Метод эквивалентного момента

Если момент двигателя пропорционален току, то можно пользоваться методом эквивалентного момента.

Эквивалентный момент $M_{\text{э}}$ – это постоянный момент нагрузки, который вызывает такой же нагрев двигателя, как и реально изменяющийся момент в соответствии с графиком работы механизма.

Эквивалентный момент

$$M_{\text{э}} = \sqrt{1/t_{\text{ц}} \int_0^t M^2 dt} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_0}}, \quad (4.4)$$

где $M_1, M_2, \dots, M_n$ – момент соответственно в течение времени $t_1, t_2, \dots, t_n$.

Условие правильности выбора двигателя $M_{\text{э}} \leq M_{\text{н}}$, где $M_{\text{н}}$ – номинальный момент двигателя.

Этот метод применим для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, для асинхронных двигателей и других, у которых момент пропорционален току и соблюдены условия, указанные для метода эквивалентного момента.

Метод эквивалентной мощности

Если скорость двигателя изменяется мало и можно считать, что мощность пропорциональна моменту и, следовательно, току, то эквивалентная мощность

$$P_{\text{э}} = \sqrt{1/t_{\text{ц}} \int_0^t P^2 dt} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_0}}, \quad (4.5)$$

где $P_1, P_2, \dots, P_n$ – мощность соответственно в течение времени $t_1, t_2, \dots, t_n$; t_0 – время паузы.

Производить проверку двигателя на нагрев по эквивалентной мощности можно для нерегулируемых по скорости электродвигателей, у которых момент пропорционален току.

Условия правильности выбора электродвигателя: $P_{\text{э}} \leq P_{\text{н}}$.

С учетом условия ухудшения охлаждения у двигателей с самовентиляцией во время пауз и при снижении скорости формула для эквивалентного тока:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{\beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \dots + \beta_n t_n + \dots + \beta_0 t_0}}, \quad (4.6)$$

где $\beta_1 = 0,5$ – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения в процессе разгона и торможения двигателя; $\beta_2 = 0,8 \dots 1,0$ – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения при работе с постоянной скоростью; $\beta_0 = 0,3$ – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения при стоянке двигателя в течение времени t_0 .

4.3. НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ И ТАХОГРАММЫ

Основой для выбора электродвигателя и расчета его мощности являются нагрузочные диаграммы и диаграмма скорости (тахограмма). Примеры нагрузочных диаграмм и тахограммы представлены на рис. 4.4.

Нагрузочной диаграммой производственного механизма называют зависимость приведенного к валу двигателя момента сопротивления движению M_c (статического момента) от времени: $M_c = f(t)$. Эту диаграмму рассчитывают на основе данных, характеризующих работу машины (механизма).

Нагрузочная диаграмма электропривода – это зависимость момента, развиваемого двигателем от времени. Ее рассчитывают как алгебраическую сумму статического M_c и динамического $M_{\text{дин}}$ моментов: $M = M_c + M_{\text{дин}} = f(t)$.

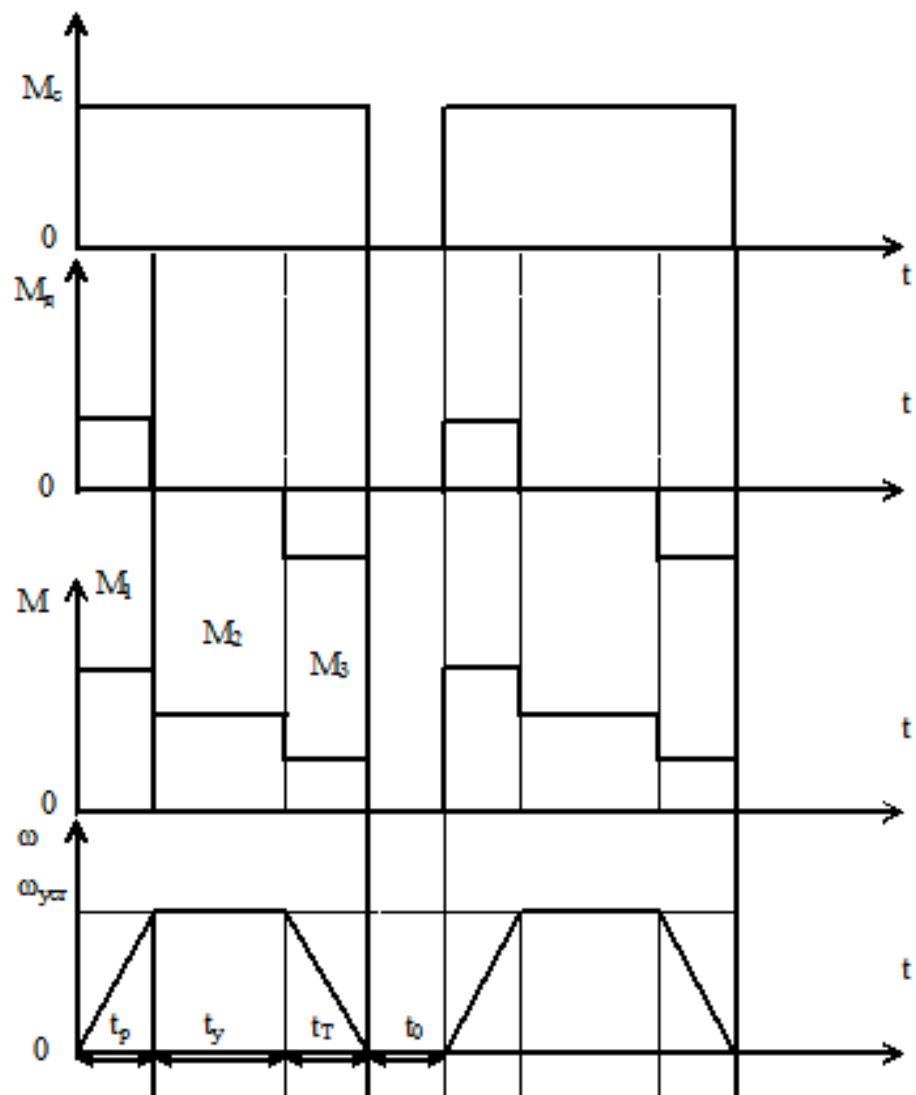


Рис. 4.4. Нагрузочные диаграммы и тахограмма

Тахограмма – это зависимость скорости рабочего органа машины или вала двигателя от времени $\omega = f(t)$.

5. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО РОДУ ТОКА

Выбор электродвигателя для промышленного использования требует большого объема знаний о технических характеристиках и особенностях различных типов двигателей. Правильно подобранный электродвигатель обеспечит эффективную работу производственного оборудования, позволит снизить энергозатраты и увеличить срок службы машины.

По роду тока различают двигатели постоянного и переменного тока. Последние в свою очередь делятся на асинхронные и синхронные двигатели.

При выборе электродвигателя по роду тока необходимо учитывать специфику оснащения и организации конкретной рабочей площадки, какой источник энергии доступен в производственном процессе, условия эксплуатации оборудования, способы пуска и остановки двигателя, регулирование (при необходимости) скорости вращения, режимы работы и т.п.

Рассмотрим основные типы ЭД и определим область их применения.

5.1. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатели постоянного тока (ДПТ) имеют хорошие регулировочные характеристики, обладают высокой перегрузочной способностью и позволяют получить как жесткие, так и мягкие механические характеристики.

Основным недостатком ДПТ является необходимость наличия источника постоянного тока или преобразователя переменного напряжения в постоянное, что требует дополнительных финансовых затрат.

Конструкция ДПТ сложнее и их стоимость выше, чем, например, у АД. Несмотря на это, эти двигатели широко используются в различных областях народного хозяйства. ДПТ применяют в черной металлургии (прокатные станы, роликовые транспортеры), на транспорте (электровозы, электропоезда, электромобили и др.), в грузоподъемных и землеройных устройствах (краны,

подъемники, экскаваторы), в металлообрабатывающей, бумажной и текстильной, полиграфической промышленности

ДПТ малой мощности применяются в системах автоматического регулирования для привода исполнительных механизмов.

К достоинствам электропривода постоянного тока можно отнести большой диапазон регулирования скорости вращения, плавность регулирования в широких пределах, в том числе и вверх от номинальной скорости, создание большого пускового момента.

Рабочие свойства ДПТ зависят в значительной мере от способа соединения обмотки возбуждения с якорем машины. Различают машины с независимым возбуждением, параллельным возбуждением, последовательным возбуждением и смешанным возбуждением (рис. 5.1).

Двигатели с независимым (рис. 5.1, а) и параллельным (рис. 5.1, б) возбуждением дают возможность получения достаточно жесткой электромеханической характеристики (рис. 5.2, а). Эти двигатели нашли применение в случаях, где требуются высокие регулировочные свойства привода.

У двигателей с последовательным возбуждением (рис. 5.1, в) скорость вращения зависит от нагрузки на валу в большей степени. При малых нагрузках скорость вращения велика, а при увеличении нагрузки – сильно снижается (рис. 5.2, б).

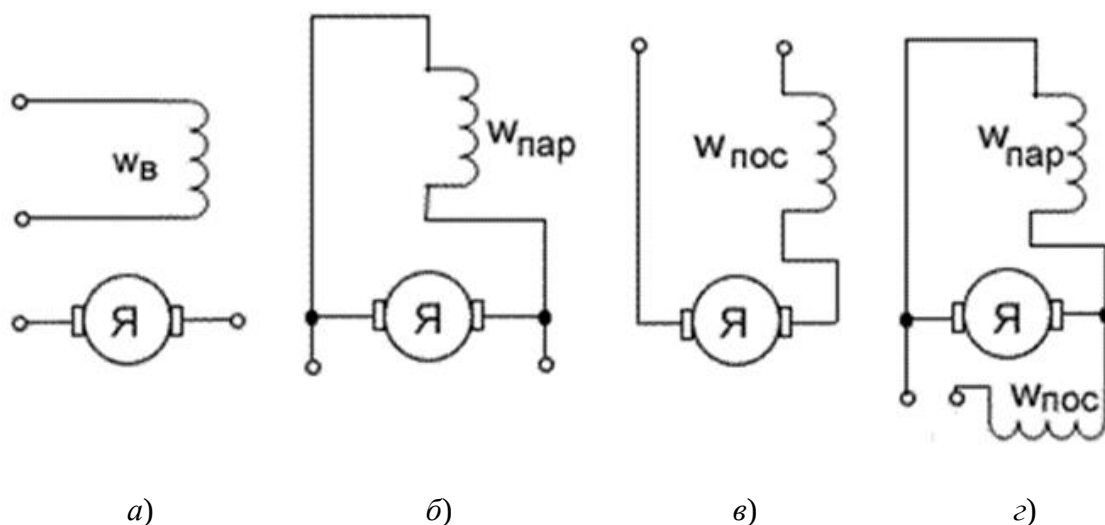


Рис. 5.1. ДПТ с независимым (а), параллельным (б), последовательным (в), смешанным (г) возбуждением

Работа таких двигателей холостую недопустима, так как скорость может увеличиться до значения, при котором возможны механические повреждения якоря двигателя (двигатель «идет вразнос»). Другой особенностью ДПТ последовательного возбуждения является его более высокая перегрузочная способность, поэтому такие двигатели нашли широкое применение на электрифицированном транспорте, в подъемных механизмах наиболее ответственных кранов и др. От двигателей в таком случае требуется повышенный пусковой момент, а когда скорость уже достаточно высока, большой электромеханический момент уже не нужен – нагрузка уже минимальна.

Чтобы избежать выхода ДПТ «в разнос» для обеспечения транспортной электромеханической характеристики применяется схема смешанного возбуждения (рис. 5.1, *г*). Двигатели смешанного возбуждения имеют две обмотки возбуждения, одна из которых включается параллельно с обмоткой якоря, другая – последовательно. Наличие параллельной обмотки возбуждения позволяет ограничивать скорость вращения двигателя при снижении нагрузки (рис. 5.2, *в*). При этом момент двигателя при пуске также велик, а при отсутствии нагрузки скорость будет ограничена. По своим свойствам двигатели смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между вышеописанными двигателями.

Наибольшее распространение в ЭП постоянного тока получили двигатели независимого (ДПТНВ), последовательного (ДПТПВ) и смешанного возбуждения (ДПТСВ), а также двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, которые по своим характеристикам близки к ДПТНВ.

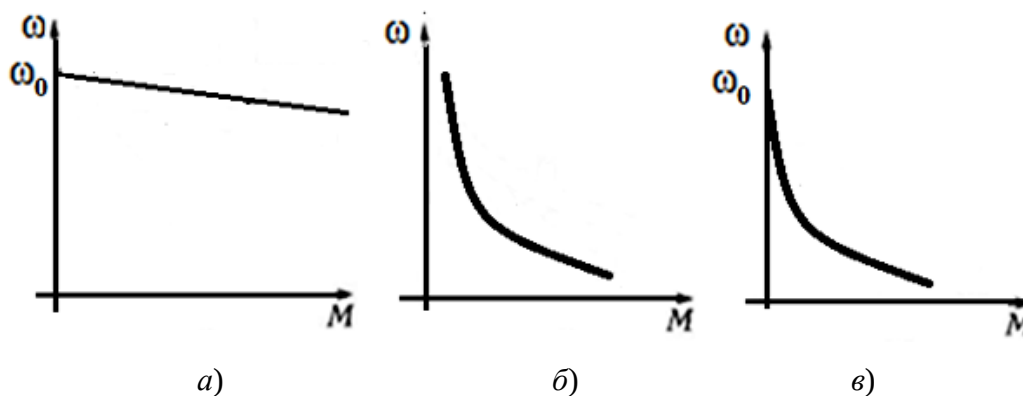


Рис. 5.2. Механические характеристики ДПТ с независимым и параллельным возбуждением (а), последовательным (б) и смешанным (в) возбуждением

Габаритные двигатели постоянного тока, имеющие жесткие характеристики, независимое и смешанное возбуждение, применяются для привода морских гребных винтов на кораблях и мотор-колес на карьерных самосвалах.

Тяговые электродвигатели, имеющие мягкие характеристики, последовательное или смешанное возбуждение, применяются для привода локомотивов, трамваев, троллейбусов и т.д., где для начала движения состава необходим большой пусковой момент для преодоления инерции больших масс и малый момент при движении на высоких скоростях.

Такие же свойства двигателей постоянного тока используются в приводах подъемно-транспортных устройств (краны, лифты) и экскаваторов.

Основным недостатком ДПТ является возможность их эксплуатации исключительно при наличии источника постоянного тока или преобразователя переменного напряжения в постоянный ток. Обеспечение данного условия требует дополнительных финансовых затрат.

5.2. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Выбор рода тока приводного электродвигателя зависит от многих факторов. Как указывалось ранее, применение ЭД постоянного тока обуславливается необходимостью регулирования частоты вращения производственного механизма в широких пределах. Однако двигатели постоянного тока характеризуются сложной технологией изготовления, они более дорогие и менее надежные в эксплуатации по сравнению с двигателями переменного тока.

К достоинствам ЭД переменного тока можно отнести следующее:

- электроэнергия вырабатывается и передается потребителям в основном на переменном токе;
- электродвигатели переменного тока по габаритам, весу и стоимости в 1,5–2,5 раза меньше двигателей постоянного тока той же мощности и частоты вращения;

– момент инерции двигателей переменного тока в 1,5–1,7 раза ниже, чем у ДПТ, что обуславливает более высокое быстродействие систем привода переменного тока;

– энергетические показатели и регулировочные свойства систем переменного тока с преобразователями не хуже, чем у приводов постоянного тока. Например, перегрузочная способность у приводов с синхронными двигателями выше, чем у двигателей постоянного тока.

В качестве приводных двигателей переменного тока применяют в основном трехфазные асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым и фазным ротором, а также синхронные двигатели (СД).

Механические характеристики АД и СД представлены на рис. 5.3.

Участок механической характеристики АД 1 – 3 соответствует устойчивой работе, участок 3–4 – неустойчивой работе.

1 – идеальный холостой ход двигателя, когда $n = n_0$.

2 – номинальный режим работы двигателя.

3 – соответствует критическому моменту $M_{кр}$ и критической частоте вращения $n_{кр}$.

4 – соответствует пусковому моменту двигателя $M_{пуск}$.

Механическая характеристика синхронного двигателя имеет вид горизонтальной прямой.

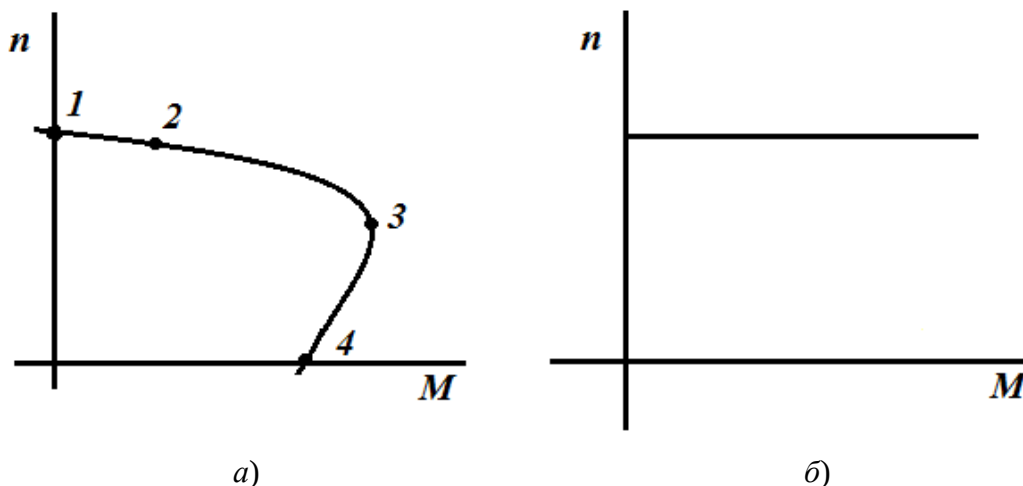


Рис. 5.3. Механические характеристики АД (а), СД (б)

АД получили наибольшее распространение в промышленности. Они экономичны, надежны и имеют широкий диапазон мощностей. Синхронные электродвигатели используются в тех случаях, когда требуется высокая точность синхронизации работы двигателя с внешними процессами, например для привода генераторов.

Наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АД с КЗР). Эти двигатели обладают рядом специфических особенностей в отношении условий пуска, реверса и торможения, которые необходимо учитывать при выборе двигателя.

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором (АД с ФР) являются более дорогостоящими устройствами, требуют квалифицированного обслуживания, менее надежны, а потому применяются только в тех отраслях производства, в которых без них обойтись нельзя.

Благодаря простоте и надежности конструкции АД нашли широкое применение в различных областях промышленности и сельского хозяйства. Их используют в электроприводе металлорежущих станков, подъемно-транспортных машин, транспортеров, насосов, вентиляторов. Маломощные двигатели используются в устройствах автоматики.

АД целесообразно применять для решения следующих производственных задач:

- Для обслуживания механизмов, работающих с остановками (плановыми или вынужденными, когда оборудованию требуется фиксация вала после аварийного отключения энергии), незаменимы асинхронные механизмы, оснащаемые электромагнитным тормозом. Они нашли широкое применение в лебедках, различных станках, в том числе металлообрабатывающих.
- Многоскоростные устройства применяют там, где требуется поступательное регулируемое изменение скорости работы – в подъемниках, лифтах и т.д.
- Выбор электродвигателя с увеличенным скольжением оправдан при работе с техникой, которая эксплуатируется по графику (повторно-

кратковременные режимы запуска и остановки) или работает с пульсирующей нагрузкой.

Синхронные двигатели используют в приводе переменного тока большой мощности (более 50 кВт), работающих, как правило, в длительном режиме без частых пусков и остановов.

Основное преимущество СД по сравнению с АД заключается в том, что благодаря возбуждению постоянным током синхронные двигатели могут работать с $\cos\varphi = 1$ и не потреблять при этом реактивной мощности из сети.

Однако конструкция синхронных двигателей сложнее, чем АД с КЗР, они должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током. Вследствие этого синхронные двигатели в большинстве случаев дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Таким образом, можно сделать вывод, что ДПТ применяются в тех случаях, когда двигатели переменного тока не обеспечивают требуемых характеристик механизма либо не экономичны. При этом для механизмов большой мощности с продолжительным режимом работы без частых пусков и остановов наиболее целесообразно применение синхронных двигателей.

6. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ

Одним из важнейших критериев выбора электродвигателя является соответствие его мощности. При выборе двигателя по мощности необходимо ориентироваться на мощность производственного механизма, который данный двигатель будет приводить в движение. При этом необходимо учитывать, что выбранная мощность, необходимая для конкретного технологического процесса, не будет вызывать недопустимый нагрев частей двигателя, а большой запас ресурса в свою очередь приведет к недоиспользованию производительности, и, следовательно, к переплатам за обслуживание более дорогой модели, ее ремонт, а также к снижению КПД.

6.1. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ

Зная род тока двигателя и определив мощность производственного механизма, по каталогу выбираем двигатель ближайшей большей номинальной мощности:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{мех}} / \eta_{\text{п}}, \quad (6.1)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт; $P_{\text{мех}}$ – мощность, потребляемая производственным механизмом, кВт; $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи.

Номинальная мощность двигателя определяется выражением

$$P_{\text{ном}} = \omega M \cdot 10^{-3} = 0,105 M n \cdot 10^{-3}, \quad (6.2)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт; M – вращающий момент, Н·м;

ω – угловая скорость вращения двигателя, с^{-1} , $\omega = \frac{\pi n}{30}$; n – частота вращения двигателя, об/мин.

Таким образом, выбор электродвигателя по мощности зависит от специфики эксплуатации оборудования, к которому он подключается. Нагрузки оценивают по номинальному режиму и изменениям величины мощности потреб-

ления. При этом расчетная величина мощности должна обеспечивать работу двигателя:

- с нормальным нагревом;
- достаточным пусковым моментом;
- перегрузочной способностью в установленных пределах.

Рассмотрим примеры расчета мощности основных производственных механизмов.

6.2. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

1. Расчетная мощность двигателей для насосов

$$P_p = \frac{Q\rho H g k_3}{\eta_n} \cdot 10^{-3}, \quad (6.3)$$

где P_p – расчетная мощность двигателя, кВт; Q – производительность насоса, м³/с; H – напор, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с²; η_n – КПД насоса; k_3 – коэффициент запаса, $k_3 = 1,1 \dots 1,3$.

Выбираем по каталогу двигатель по условию

$$P_{\text{ном}} \geq P_p.$$

2. Расчетная мощность двигателей для вентиляторов

$$P_p = \frac{Q p k_3}{\eta_v \eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3}, \quad (6.4)$$

где P_p – расчетная мощность двигателя, кВт; Q – производительность вентилятора (объемный расход воздуха), м³/с; p – давление газа, Па; η_v – КПД вентилятора; $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи; k_3 – коэффициент запаса.

Значение коэффициента запаса зависит от мощности двигателя:

до <1 кВт – $k_3 = 2$;

от 1 до 2 кВт – $k_3 = 1,5$;

от 5 и более – $k_3 = 1,1 \dots 1,2$.

Выбираем по каталогу двигатель по условию

$$P_{\text{ном}} \geq P_p.$$

3. Расчетная мощность двигателей для компрессоров

$$P_p = \frac{QAk_3}{\eta_k \eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3}, \quad (6.5)$$

где P_p – расчетная мощность двигателя, кВт; Q – производительность компрессора, м³/с; η_k – КПД компрессора; $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи; k_3 – коэффициент запаса, $k_3 = 1,05 \dots 1,15$; A – усилие, требуемое для сжатия 1 кубометра воздуха до нужных значений давления, Дж/м³.

Выбираем по каталогу двигатель по условию

$$P_{\text{ном}} \geq P_p.$$

4. Расчетная мощность двигателей для конвейера

$$P_p = \frac{mgvk_{\text{тр}}k_3}{\eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3}, \quad (6.6)$$

где m – масса транспортируемого груза, кг; g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с²; v – скорость движения ленты, м/с; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; k_3 – коэффициент запаса, $k_3 = 1,2$; $\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи.

Выбираем по каталогу двигатель по условию

$$P_{\text{ном}} \geq P_p.$$

5. Расчетная мощность двигателя грузоподъемных устройств.

Расчетная мощность электродвигателя подъемной лебедки при подъеме груза определяется по формуле

$$P_p = \frac{mgvk_3}{k_{\text{п}}\eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3}, \quad (6.7)$$

где m – масса поднимаемого груза, кг; g – ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$; v – скорость подъема груза, м/с; k_{Π} – коэффициент числа механизмов, поднимающих груз; k_3 – коэффициент запаса, $k_3 = 1,1 \dots 1,5$; η_{Π} – КПД передачи.

Для разных кранов коэффициент k_{Π} принимает следующие значения:

- крюковой кран с одной лебедкой подъема – $k_{\Pi} = 1$;
- крюковой кран с двумя лебедками подъема и общим грузовым канатом (контейнерные краны, краны со специальными захватами) – $k_{\Pi} = 2$;
- крюковой кран с двумя лебедками и двумя независимыми подъемными;
- канатами и общей траверсой – $k_{\Pi} = 1,8$;
- грейферный кран:
 - для замыкающей лебедки в процессе замыкания грейфера – $k_{\Pi} = 1$;
 - при подъеме груженого грейфера совместно с замыкающей лебедкой – $k_{\Pi} = 1,8$.

Выбираем по каталогу двигатель по условию

$$P_{\text{ном}} \geq P_p.$$

7. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

7.1. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Уравнение механической характеристики ДПТ имеет вид:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{C\Phi} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{(C\Phi)^2},$$

где $U_{\text{я}}$ – напряжение, приложенное к якорю, В; C – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей машины; M – момент, развиваемый на валу двигателя, Н м; $R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи двигателя, Ом; $R_{\text{д}}$ – добавочное сопротивление реостата, Ом.

Как видно из этого уравнения, регулировать скорость его вращения ДПТ можно изменением сопротивления, магнитного потока и напряжения на якоре.

Регулирование угловой скорости изменением сопротивления

Рассмотрим этот способ регулирования на примере ДПТ с независимым возбуждением (рис. 7.1).

На якорь и обмотку возбуждения двигателя подается номинальное напряжение: $U_{\text{я}} = U_{\text{ном}}$, $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$, к обмотке якоря подключено дополнительное сопротивление $R_{\text{д}}$ в виде регулировочного реостата.

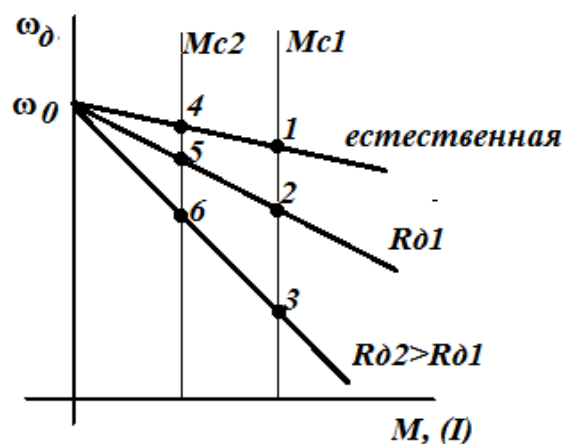


Рис. 7.1. Естественные и реостатные характеристики ДПТ

Как видно из уравнения механической характеристики и рис. 7.1, с увеличением добавочного сопротивления скорость вращения снижается с точки 1 на точки 2 и 3 соответственно. При изменении момента сопротивления с M_{c1} до M_{c2} скорость вращения будет определяться точками 4, 5, 6.

Про данный способ регулирования скорости вращения можно сказать следующее:

1. Регулирование однозонное – вниз от основной скорости.
2. Диапазон реостатного регулирования невелик $(2,0...2,5):1$, при изменении M_c на 40...50%.

Стабильность скорости – низкая.

3. Реостатное регулирование – ступенчатое.
4. Можно считать, что $M_{доп} = M_n$ на любой реостатной характеристике, так как магнитный поток неизменен.

5. Капитальные затраты на реостатное регулирование сравнительно невелики.

Этот метод применяется на практике в подъемно-транспортных установках, общепромышленных механизмах и в случаях, когда источником питания является сеть постоянного тока.

Регулирование скорости вращения ДПТ изменением магнитного потока

Регулирование скорости изменением магнитного потока полюсов называют полюсным регулированием. Изменить магнитный поток можно, изменяя ток возбуждения. Так как номинальный ток возбуждения $I_{вн}$ соответствует допустимому нагреву обмоток возбуждения, то при регулировании скорости в условиях продолжительной работы ток возбуждения можно только уменьшать.

При значительном уменьшении тока возбуждения (особенно при обрыве цепи) ток якоря и скорость вращения нагруженного двигателя сильно возрастают, усиливается искрение щеток и появляется опасность механических повреждений двигателя. Это явление недопустимо, поэтому двигатель снабжают автоматической защитой, отключающей его от сети при чрезмерном уменьшении потока.

Полюсное регулирование обычно ведется на уменьшение потока при больших нагрузках для увеличения скорости сверх номинальной. При моментах нагрузки, близких к номинальному, с уменьшением потока ток якоря превысит номинальный, что в длительном режиме недопустимо.

Естественная и искусственные характеристики при данном способе регулирования представлены на рис. 7.2.

Полюсное регулирование на уменьшение потока очень распространено, так как оно экономично и удобно.

Про данный способ регулирования скорости вращения можно сказать:

1. Регулирование скорости при $U = \text{const}$ – однозонное – вверх от основной скорости. Это главный недостаток способа, существенно ограничивающий область его применения. Способ обычно применяется в сочетании с другими, позволяющими регулировать скорость вниз от основной.

2. Диапазон регулирования скорости – до (3–4):1.

3. Регулирование скорости плавное.

4. При данном способе регулирования допустимая мощность, снимаемая с вала машины на искусственных характеристиках, неизменна.

5. Данный способ регулирования скорости вращения достаточно прост в реализации, не сопровождается дополнительными потерями энергии, является экономичным.

6. Капитальные затраты на регулирование низкие.

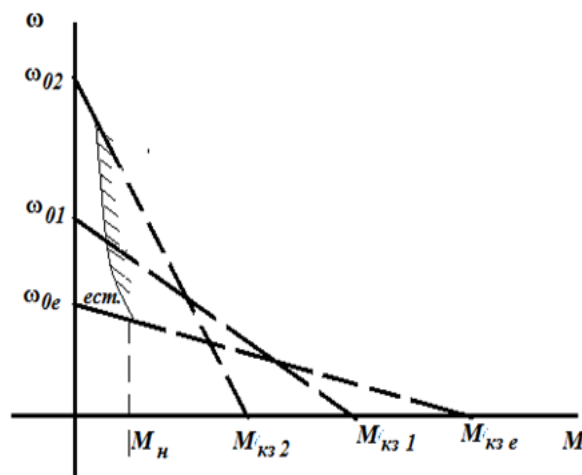


Рис. 7.2. Естественные и регулировочные характеристики ДПТ

Регулирование скорости ДПТ изменением напряжения на якоре

Якорное регулирование (регулирование изменением напряжения) – безреостатное изменение напряжения на якоре. Для реализации данного способа регулирования необходимо наличие силового управляемого преобразователя, установленная мощность которого превышает мощность двигателя.

Увеличение напряжений до значений, больших номинального, нежелательно, так как частота вращения при этом становится больше номинальной величины, а это может привести к преждевременному износу машины. На практике иногда допускается увеличение напряжения на якоре на 15...20% выше номинального напряжения.

Про данный способ регулирования скорости вращения можно сказать следующее:

1. Регулирование однозонное, вниз от основной скорости.
2. Диапазон регулирования в разомкнутой структуре (8 – 10):1, стабильность скорости достаточно высокая.
3. Регулирование плавное.
4. $M_{\text{доп}} = M_{\text{н}}$, так как $c\Phi = c\Phi_{\text{н}} = \text{const}$.
5. Способ экономичен в эксплуатации.
6. Капитальные затраты определяются типом используемого УП.

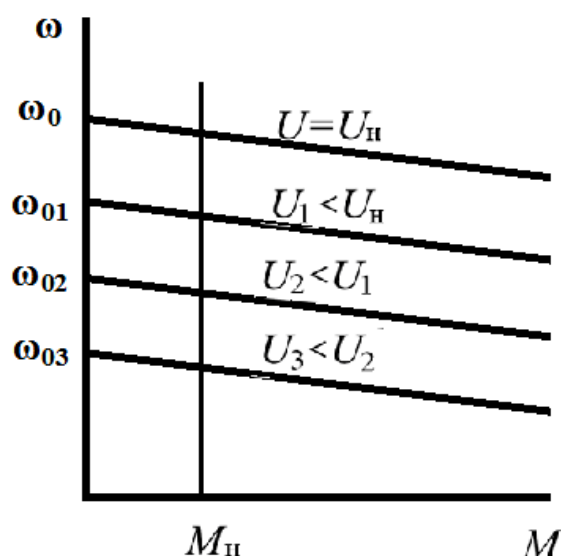


Рис. 7.3. Механические характеристики
при регулировании скорости ДПТ изменением напряжения

Якорное, полюсное и реостатное регулирование частоты вращения в большей степени применимы для двигателей с независимым, параллельным и смешанным возбуждением, так как они имеют обмотку возбуждения, ток которой не зависит от тока якоря. Двигатели с последовательным возбуждением имеют свои конструктивные особенности, они имеют одну обмотку, предназначенную для последовательного соединения с якорем. Поэтому при отсутствии дополнительных устройств ток обмотки возбуждения всегда равен току якоря. Перераспределение токов при необходимости можно реализовать с помощью дополнительных реостатов, включаемых, как правило, параллельно с обмоткой якоря или параллельно с обмоткой возбуждения.

На практике основными способами изменения частоты вращения якоря двигателя последовательного возбуждения являются изменение частоты вращения с помощью изменения питающего напряжения и способ изменения сопротивления регулировочного реостата R_d .

7.2. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Частота вращения асинхронных двигателей (АД) определяется по формуле

$$n = n_0(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s), \quad (7.1)$$

где s – скольжение.

Откуда видно, что скорость вращения АД регулируется следующими способами:

Изменение частоты f питающего напряжения

Этот способ регулирования основан на изменении синхронной частоты вращения $n_0 = \frac{60f}{p}$, которая пропорциональна частоте тока в обмотках статора, поэтому данный способ применим также для синхронных двигателей. Для осуществления такого регулирования необходим источник питания с регулируемой частотой f . В качестве источника применяются электронные и полупроводниковые преобразователи частоты. С изменением питающего напряжения

будет изменяться и максимальный электромагнитный момент двигателя, поэтому одновременно с изменением частоты f регулируют и напряжение U_1 , чтобы обеспечить постоянство магнитного потока. Из выражения, связывающего напряжение U_1 с потоком Φ , следует, что напряжение U_1 необходимо регулировать пропорционально частоте f :

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f w_1 k_{\text{об}} \Phi,$$

где w_1 – число витков статорной обмотки; $k_{\text{об}}$ – обмоточный коэффициент.

Отклонение от этого закона приводит к изменению потока Φ , что нежелательно. Действительно, при увеличении потока возрастает насыщение магнитной цепи, растут потери в стали и намагничивающий ток. Уменьшение потока вызывает уменьшение максимального момента двигателя и ряд других нежелательных явлений.

Таким образом, отношение напряжения к частоте должно оставаться постоянным: $U_i / f_i = U_1 / f_1 = \text{const}$.

При $U/f = \text{const}$ механические характеристики двигателя имеют вид, показанный на рис. 7.4.

При снижении частоты f пусковой момент двигателя возрастает, а максимальный несколько снижается, для компенсации этого и увеличения пускового момента используется повышение уровня напряжения. Рабочее скольжение двигателя остается небольшим, что характеризует экономичный режим работы двигателя.

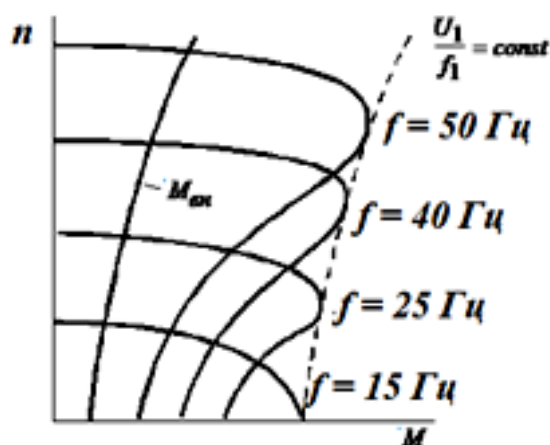


Рис. 7.4. Механические характеристики АД при преобразовании частоты f

Частотное регулирование позволяет плавно регулировать частоту вращения в широком диапазоне, сохраняя при этом жесткость механических характеристик, а следовательно, и стабильность работы привода.

Однако стоимость этого способа регулирования весьма высока, так как преобразователь частоты должен быть выполнен на полную мощность двигателя. Тем не менее частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) в последнее время получил широкое распространение, что связано с созданием преобразователей частоты на принципиально новой элементной базе, в основном на биполярных транзисторах с изолированным затвором.

Наибольшее распространение получил ЧРП на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Здесь применяют скалярное и векторное частотное управление.

При скалярном управлении по определенному закону изменяют амплитуду и частоту приложенного к двигателю напряжения. Для поддержания требуемых рабочих характеристик двигателя необходимо с изменением частоты соответственно изменять и амплитуду напряжения.

Векторное управление позволяет существенно увеличить диапазон регулирования, его точность, повысить быстродействие двигателя. Этот метод осуществляет непосредственное управление вращающим моментом. При этом необходимо изменять, кроме амплитуды, и фазу статорного тока, т.е. его вектор. Для управления вектором тока, а следовательно, и положением магнитного потока статора относительно вращающегося ротора необходимо знать точное положение ротора в любой момент. Для этого требуется датчик положения ротора либо определение его положения путем вычислений.

Векторный метод управления позволяет получить диапазон регулирования 1:1000 и выше, точность регулирования по скорости составляет сотые доли процента, точность по моменту – единицы процентов.

Регулирование скорости вращения АД изменением числа пар полюсов p

Этот способ используется в многоскоростных двигателях, которые имеют обмотку статора с изменяемым числом полюсов. Такой способ регулирования, как частотный, экономичен, его широко применяют для ступенчатого измене-

ния частоты вращения АД с КЗР. Так как количество пар полюсов может быть равно только целому числу, то данный способ обеспечивает только ступенчатое регулирование.

Обычно многоскоростные асинхронные двигатели выполняются с двумя, тремя и четырьмя ступенями скоростей. Для этой цели отдельные катушки, составляющие одну фазу, переключаются так, чтобы изменялось соответствующим образом направление тока в них (например, с последовательного согласного соединения на встречное или при переключении катушек с последовательного на параллельное соединение.). При согласном включении катушек число полюсов равно четырем, при встречно-последовательном и встречно-параллельном включении – двум. Если нужно иметь три или четыре частоты вращения, то на статоре располагают еще одну обмотку, при переключении которой можно получить еще две частоты.

При встречно-последовательном включении обмоток мощность обмотки остается неизменной, $P_{\text{дв}} = U_{\phi} I_{\phi} = \text{const}$, а момент, развиваемый двигателем, снижается в 2 раза. Такой способ регулирования удобен, например для металлорежущих станков. При встречно-параллельном включении мощность обмотки возрастает в 2 раза, $P_{\text{дв}} = U_{\phi} 2I_{\phi}$, а момент двигателя остается постоянным, что удобно для грузоподъемных устройств.

Это необходимо учитывать при выборе способа регулирования скорости. Механические характеристики данного способа приведены на рис. 7.5.

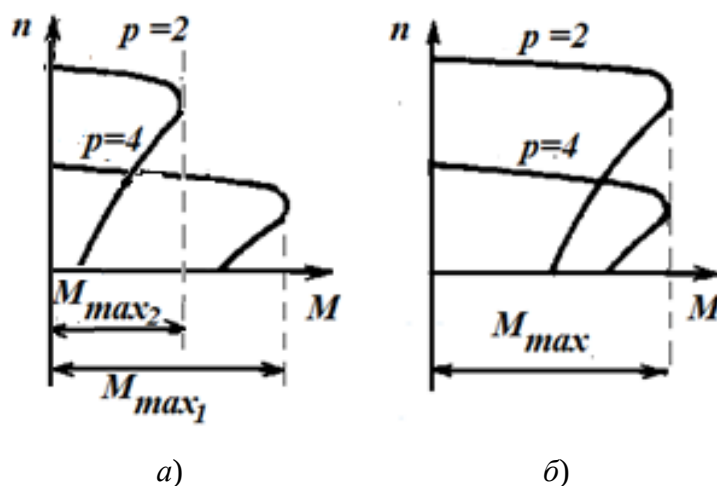


Рис. 7.5. Механические характеристики АД при изменении числа пар полюсов:

а – встречно-последовательное включение; *б* – встречно-параллельное включение

Регулирование скорости вращения АД изменением напряжения

Вращающий момент АД пропорционален квадрату питающего напряжения, поэтому, меняя напряжение, можно изменить частоту вращения двигателя. Диапазон регулирования частоты вращения этим способом очень мал. При уменьшении напряжения происходит резкое снижение критического момента двигателя и, следовательно, резкое уменьшение перегрузочной способности двигателя, что ограничивает область применения описанного способа.

Для изменения напряжения на обмотке статора АД можно использовать автотрансформаторы, магнитные усилители, тиристорные регуляторы напряжения.

Механические характеристики для данного способа регулирования приведены на рис. 7.6. Анализ этих характеристик совместно с характеристикой момента сопротивления грузоподъемного устройства $M_{с.гр}$ показывает, что при напряжении U_4 двигатель не запустится, так как $M_{п4} < M_{с.гр}$. Несколько предпочтительнее такой способ регулирования для двигателя, вращающего механизм с вентиляторным моментом сопротивления $M_{с.в}$ – здесь диапазон регулирования увеличивается.

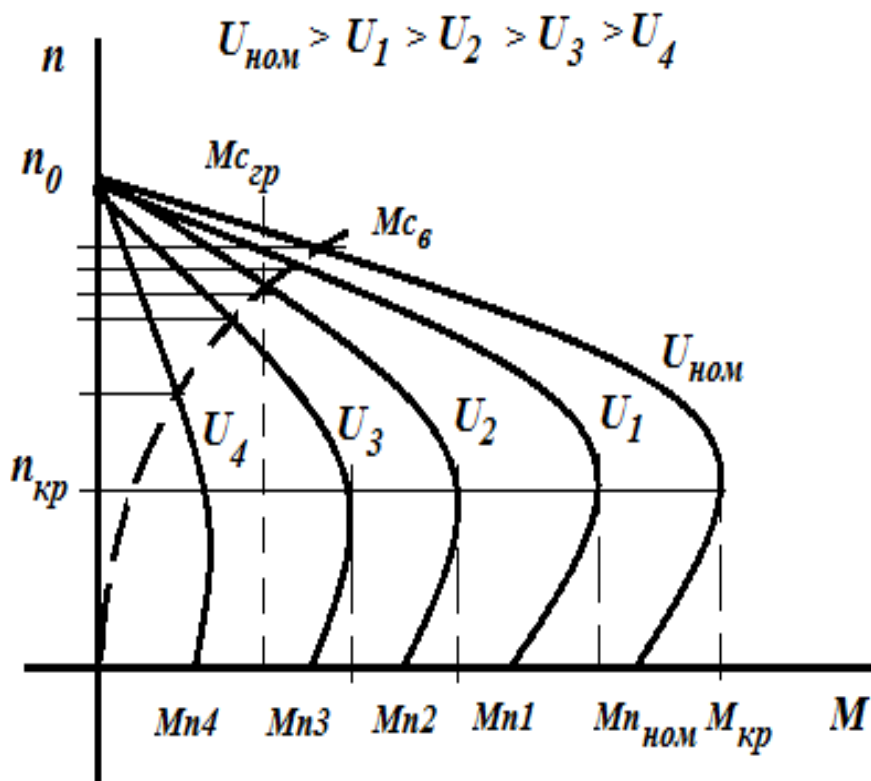


Рис. 7.6. Механические характеристики АД при снижении напряжения

Таким образом, про данный способ регулирования скорости вращения можно сказать следующее:

1. Регулирование однозонное – вниз от основной скорости.
2. Диапазон регулирования в замкнутой структуре (3–4):1; стабильность скорости удовлетворительная.
3. Плавность высокая.
4. Допустимая нагрузка резко снижается с уменьшением скорости, поскольку магнитный поток $\Phi \equiv U_1$ при $f_1 = \text{const}$.
5. Способ неэффективен для использования в продолжительном режиме. Даже для самой благоприятной нагрузке – вентиляторной ($M \equiv \omega^2$) необходимо двух-трехкратное завышение установленной мощности двигателя с повышенным скольжением, интенсивный внешний обдув.

Способ регулирования скорости изменением напряжения может в ряде случаев использоваться для кратковременного снижения скорости, а система преобразователь напряжения–АД очень полезна и эффективна для снижения пусковых токов и экономии энергии при недогрузках.

Регулирование скорости вращения АД изменением скольжения

Этот способ реализуется при использовании АД с фазным ротором путем изменения сопротивления трехфазного реостата, включенного во внешнюю цепь обмотки ротора.

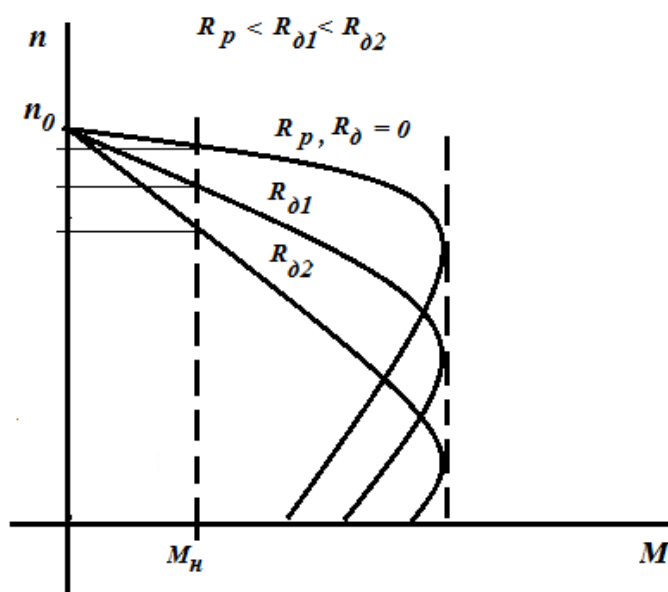


Рис. 7.7. Механические характеристики при регулировании скорости изменением скольжения

Как и в электроприводе постоянного тока, это простейший способ регулирования: в каждую фазу ротора включают одинаковые резисторы с сопротивлением R_d . Тогда общее активное сопротивление фазы ротора составит $R = R_p + R_d$, а искусственные характеристики приобретут вид, представленный на рис. 7.7. Предельное значение тока ротора $I'_{2\text{пред}}$ и критический момент M_k не изменяются, а s_k растет пропорционально R .

Показатели реостатного регулирования скорости асинхронных двигателей с фазным ротором практически те же, что у электропривода постоянного тока.

1. Регулирование однозонное – вниз от основной скорости.
2. Диапазон регулирования (2–3):1, стабильность скорости низкая.
3. Регулирование ступенчатое. В целях устранения этого недостатка иногда используются схемы, в которых роторный ток выпрямляется и сглаживается реактором, а резистор, включаемый за выпрямителем, шунтируется управляемым ключом – транзистором с управляемой скважностью, благодаря чему достигается плавность регулирования, а при использовании обратных связей формируются жесткие характеристики.
4. Допустимая нагрузка $M_{\text{доп}} = M_n$, поскольку $\Phi \approx \Phi_n$ и при мало меняющемся $\cos\varphi_2$ $I_{2\text{доп}} \approx I_{2n}$.
5. С энергетической точки зрения реостатное регулирование в асинхронном электроприводе столь же неэффективно, как и в электроприводе постоянного тока.
6. Капитальные затраты, как и в электроприводе постоянного тока, сравнительно невелики.

Регулирование скорости вращения СД

Для регулирования угловой скорости синхронных двигателей практически единственным способом является частотное регулирование. Оно характеризуется в основном такими же показателями, что и частотное регулирование скорости асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Это регулирование плавное, двухзонное. Диапазон регулирования вверх от номинальной синхронной скорости ограничивается механической прочностью ротора, его балансировкой и качеством подшипников.

В отличие от асинхронного короткозамкнутого двигателя при частотном регулировании скорости синхронный двигатель обладает тремя каналами управления моментом: изменением тока возбуждения $I_{\text{в}}$, изменением напряжения обмоток статора U и изменением частоты f напряжения обмоток статора.

Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов преобразователь частоты–синхронный двигатель для законов регулирования класса $U_i / f_i = \text{const}$ приведены на рис. 7.8.

Таким образом, про частотное регулирование скорости можно сказать следующее:

1. Регулирование двухзонное – вниз ($U_1 / f_1 \approx \text{const}$) и вверх ($U_1 = U_{1\text{н}}$, $f_1 > f_{1\text{н}}$) от основной скорости.
2. Диапазон регулирования и стабильность скорости – высокая.
3. Регулирование плавное.
4. Допустимая нагрузка – $M = M_{\text{н}}$ при регулировании вниз от основной скорости ($\Phi \approx \text{const}$), $P = P_{\text{н}}$ при регулировании вверх ($\Phi < \Phi_{\text{н}}$).
5. Способ экономичен в эксплуатации – нет дополнительных элементов, рассеивающих энергию; малы потери в переходных процессах. Современные методы так называемого векторного управления обеспечивают частотно-регулируемому электроприводу практически те же свойства по управляемости, которые имеет самый совершенный электропривод постоянного тока.

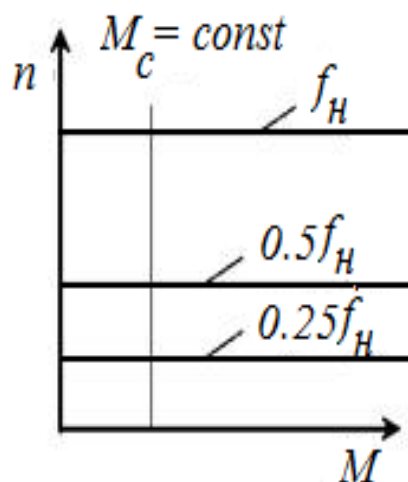


Рис. 7.8. Механические характеристики при регулировании частоты вращения СД

6. Способ требует использования преобразователя частоты (ПЧ) – устройства, управляющего частотой и амплитудой выходного напряжения. Такие устройства доступны, однако сравнительно дороги.

Помимо регулирования частоты вращения, применение частотных преобразователей обеспечивает:

- Плавный пуск и останов двигателя.
- Регулирование скорости вращения.
- Защиту от перегрузок и короткого замыкания.
- Экономия электроэнергии при работе с переменной нагрузкой.
- Возможность программирования режимов работы.

8. ВЫБОР ЭЛЕКИРОДВИГАТЕЛЯ ПО ТИПУ НАГРУЗКИ

Знание основных типов нагрузок электродвигателей и механизмов, которые они приводят в движение, может упростить выбор электродвигателя.

Для рабочих машин с постоянной частотой вращения подходят электродвигатели переменного и постоянного тока:

- ДПТ имеют более высокую перегрузочную способность и повышенный пусковой момент. Они могут обеспечить номинальный вращающий момент на низкой частоте вращения и постоянный вращающий момент в широком диапазоне частот.
- Электродвигатели переменного тока характеризуются высоким коэффициентом мощности и нетребовательны в обслуживании. Асинхронные электродвигатели с частотно-регулируемым приводом позволяют получить более высокий КПД.

Существует четыре основных типа нагрузок электродвигателей:

1. Переменные мощность и вращающий момент. Примером такой нагрузки могут служить вентиляторы, центробежные насосы, мешалки.
2. Переменная мощность и постоянный вращающий момент.

Примером такой нагрузки могут служить ленточный транспортер, редукторный насос. Для этих целей хорошо подходят двигатели постоянного тока с постоянной частотой вращения ротора.

- 3) Переменный вращающий момент и постоянная мощность.

Примером такой нагрузки могут служить металлорежущие станки, а также намоточные устройства (например, станки для перемотки кабеля), где скорость подачи материала постоянна, поэтому мощность не меняется.

Здесь необходимо учесть, что по мере намотки рулона нагрузка меняется с увеличением его диаметра. Для небольших систем такого рода хорошо подойдут ДПТ или серводвигатели. В более крупных системах, возможно,

целесообразнее будет использовать электродвигатели переменного тока с датчиками перемещений, регулированием с обратной связью.

Для решения таких задач применяют электродвигатели переменного тока с инверторным управлением и частотно-регулируемые приводы.

4) Управление положением ротора или регулирование крутящего момента.

В таких приводах необходимо обратить особое внимание на обратную связь для проверки правильности положения.

Для этих целей лучше всего подходят серводвигатели и шаговые двигатели.

Но наряду с ними часто применяются электродвигатели постоянного тока с обратной связью или электродвигатели переменного тока с инверторным управлением и датчиком перемещения, которые позволяют с малой погрешностью регулировать вращающий момент на металлургических и бумажных производствах, а также в других аналогичных применениях.

В технологических процессах, требующих управления положением ротора, применяют шаговый электродвигатель (ШД) с обратной связью или без нее, а также серводвигатель со встроенной обратной связью.

Шаговый электродвигатель – синхронный бесщеточный электродвигатель с несколькими обмотками, в котором ток, подаваемый в одну из обмоток статора, вызывает фиксацию ротора. Шаговые двигатели предназначены для перемещения в заданное положение на умеренной скорости с последующим сохранением этого положения. Двигатель без обратной связи по положению может быть использован в случае, если не происходит изменения нагрузки, так как он также обеспечивает точное управление положением ротора и перемещение его на точно заданное число шагов.

Система с обратной связью ШД обеспечивает точное высокоскоростное перемещение по заданному профилю и регулирование положения ротора.

Шаговый привод наилучшим образом подходит для автоматизации отдельных узлов и систем, где не требуется высокая динамика. ШД обладают

длительным сроком службы, соизмеримым со временем морального устаревания или выработки ресурса всего станка; точность работы ШД за это время падает незначительно. Не требовательны к техобслуживанию. Стоимость шаговых приводов в среднем в 1,5–2 раза ниже сервоприводов.

Сервопривод – механизм, позволяющий устанавливать и фиксировать рабочий орган оборудования в заданных положениях, перемещать его в соответствии с заданной программой. Они могут поддерживать необходимый момент на валу при нулевой скорости вращения вала. Это используется для удержания исполнительного механизма в одном положении под нагрузкой.

Сервоприводы устанавливают на станках с ЧПУ, грузоподъемных механизмах, промышленных роботах.

Серводвигатель обеспечивает большой крутящий момент на высоких частотах вращения в сравнении с шаговым электродвигателем, а также эффективнее работает в изделиях, характеризующихся высокими динамическими нагрузками или сложным характером перемещения.

Один из главных параметров устройств – точность позиционирования. Она не должна превышать предельную погрешность положения исполнительных механизмов или перемещения рабочего инструмента.

При выборе необходимо обратить внимание на диапазон регулирования скорости и момента на валу. Параметры подбирают по требованиям оборудования. Например, сервопривод автоматизированных станков должен обеспечивать требуемую скорость обработки для того или иного материала. Момент вала на валу выбирают по характеру и величине нагрузки. Для исключения перегрузок лучше приобрести сервопривод небольшим запасом мощности двигателя.

Кроме точности позиционирования, диапазона изменения момента и скорости, также учитывают:

- Тип поддерживаемых интерфейсов обмена данными.
- Скорость отклика. Скорость отклика должна отвечать требованиям оборудования или механизма.

- **Исполнение.** Класс защиты от влаги пыли, тип охлаждения выбирают исходя из предполагаемых условий эксплуатации.
- **Электрические параметры.** Номинальное напряжение, потребляемый ток, выбирают по возможностям и виду электросети.
- **Дополнительные функции.** Современные сервоприводы выполняют функции отключения при авариях, предупреждений при ненормальных режимах работы, ведения журнала и многие другие.

К достоинствам сервопривода можно отнести надежность и безотказность, а следовательно, возможность использовать его в ответственных, не терпящих отказа устройствах. Бесшумность и плавность работы делают сервоприводы иногда единственным возможным вариантом при выборе двигателя. Недостатки – высокая стоимость и сложность настройки, которая иногда делает применение сервопривода необоснованным.

ЗАДАЧИ

Задача 1

Рассчитать расход охлаждающей среды V , $\text{м}^3/\text{с}$ (вода, воздух, трансформаторное масло), необходимый для отвода тепла из машины, если известно:

- перепад температур между выходящей нагретой охлаждающей средой и поступающей в машину Θ , $^{\circ}\text{C}$;
- потери энергии на нагрев машины P , кВт;
- удельная объемная теплоемкость охлаждающей среды C , $\text{Дж}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^3)$:
воды – $4183 \text{ Дж}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^3)$; воздуха – $1100 \text{ Дж}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^3)$; трансформаторного масла – $1666 \text{ Дж}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^3)$.

Сделать выводы.

Номер варианта	Θ , $^{\circ}\text{C}$	P , кВт	Номер варианта	Θ , $^{\circ}\text{C}$	P , кВт
1	10	1,0	14	18	1,5
2	12	2,0	15	10	2,2
3	15	3,0	16	12	1,8
4	17	4,0	17	15	1,5
5	22	1,2	18	17	1,0
6	25	1,5	19	22	2,0
7	28	2,2	20	25	3,0
8	16	1,8	21	28	4,0
9	12	1,5	22	16	1,5
10	14	1,0	23	12	2,2
11	20	2,0	24	14	1,8
12	25	3,0	25	20	1,5
13	12	4,0	26	25	1,0

Задача 2

Для трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором известно: номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, мощность $P_{\text{ном}}$, скольжение $s_{\text{ном}}$, % ; коэффициент перегрузки по моменту λ , отношения $M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}$, $I_{\text{п}} / I_{\text{ном}}$. Определить потребляемую двигателем мощность, номинальный, максимальный и пусковой моменты; номинальный и пусковой токи; номинальное и критическое скольжение. По формуле Клосса построить механическую характеристику для значений скольжения $s = 0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; s_{\text{ном}}; s_{\text{кр}}$.

Номер Варианта	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$s_{\text{ном}}, \%$	$\cos\varphi$	λ	$M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}} / I_{\text{ном}}$	η
$n_0 = 3000 \text{ об/мин}$								
1	220	10	2,0	0,85	2	1,1	5	0,86
2	220	15	2,0	0,85	2	1,2	7	0,86
3	220	20	2,0	0,87	2	1,3	5	0,87
4	220	30	3,0	0,87	2	1,4	6	0,88
5	220	40	3,0	0,88	2	1,5	6	0,885
6	220	25	3,0	0,90	2	1,6	6	0,89
7	380	40	4,0	0,85	2	1,7	6	0,90
8	380	50	4,0	0,87	2	1,1	7	0,86
9	380	60	4,0	0,87	2	1,2	7	0,86
10	380	70	5,0	0,88	2	1,3	7	0,87
$n_0 = 1500 \text{ об/мин}$								
11	380	45	5,0	0,90	2	1,4	5,5	0,88
12	380	55	5,0	0,85	2,2	1,5	5,5	0,885
13	380	35	3,5	0,87	2,2	1,6	6,5	0,89
14	380	30	3,5	0,87	2,2	1,7	6,5	0,90
15	220	8	3,5	0,88	2,2	1,1	7,0	0,86
16	220	6	3,5	0,90	2,2	1,5	7,0	0,86
17	220	12	2,5	0,90	2,2	1,6	5,5	0,87
18	220	17	2,5	0,90	2,2	1,7	5,5	0,88
19	220	22	2,5	0,85	2,2	1,1	6,5	0,885
20	220	5	2,5	0,85	2,2	1,2	6,5	0,89
$n_0 = 1000 \text{ об/мин}$								
21	380	30	2	0,85	2,2	1,3	5,5	0,86
22	380	40	3	0,87	2	1,4	6,5	0,87
23	380	25	3	0,87	2,2	1,5	6,5	0,88
24	220	40	3	0,88	2	1,6	7,0	0,86
25	220	50	4	0,90	2,2	1,3	5,5	0,87

Задача 3

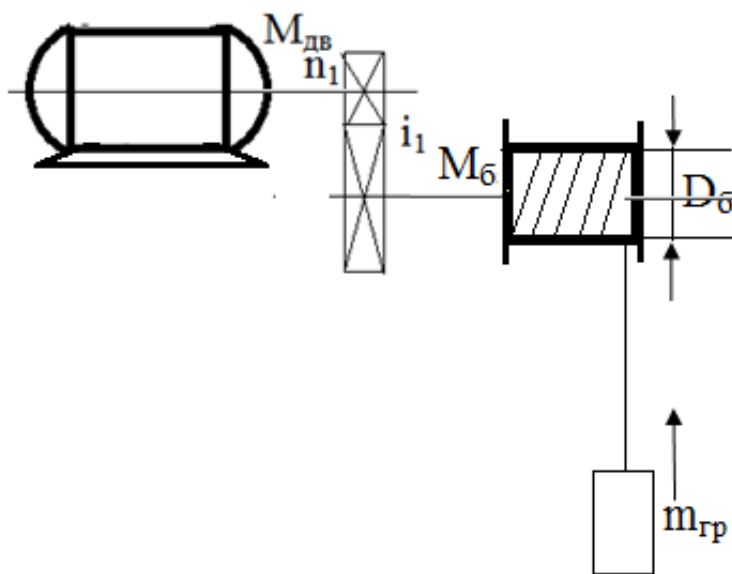
Выбрать по мощности ДПТ параллельного возбуждения, известно: номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, В; частота вращения n , об/мин; коэффициент C ; магнитный поток Φ , Вб, и сопротивление якоря $R_{\text{я}}$, Ом. Определить ток якоря $I_{\text{я}}$, А, электромагнитный момент $M_{\text{эл}}$, Н·м, мощность, развиваемую двигателем на валу.

Номер варианта	$U_{\text{ном}}$, В	n , об/мин	C	$R_{\text{я}}$, Ом	Φ , Вб
1	110	800	148	1,29	0,009
2	220	750	154	27,2	0,007
3	440	1000	160	4,54	0,012
4	110	750	162	5,84	0,014
5	220	1120	144	2,52	0,008
6	110	1060	156	3,99	0,015
7	220	1500	152	10,61	0,013
8	440	750	148	0,11	0,009
9	110	2360	154	1,00	0,007
10	220	2360	160	3,99	0,012
11	440	1500	162	2,28	0,014
12	110	3000	144	0,20	0,008
13	220	1000	156	7,05	0,015
14	110	1000	152	1,79	0,013
15	220	2200	148	0,788	0,009
16	440	2240	154	0,906	0,007
17	110	2120	160	0,196	0,012
18	220	800	162	5,07	0,014
19	440	2360	144	0,279	0,008
20	110	3150	156	0,084	0,015
21	220	1220	148	1,79	0,008
22	110	1250	154	0,80	0,015
23	220	1500	160	0,90	0,013
24	440	750	162	0,19	0,009
25	220	2350	144	1,79	0,008

Задача 4

Определить мощность двигателя, его вращающий момент и частоту вращения, необходимые для подъема груза массой $m_{гр}$, кг, со скоростью v , м/с, если известно: диаметр барабана $D_б$, м; передаточное число редуктора i ; КПД редуктора η_p ; КПД барабана $\eta_б$ (рис. 3.3). Выбрать подходящий для данных условий работы двигатель по каталогу.

Схема к задаче 4



Номер варианта	$m_{гр}$, кг	v , м/с	$D_б$, м	i	η_p	$\eta_б$
1	1500	4	2,0	17	0,90	0,82
2	2000	5	1,5	20	0,91	0,85
3	1000	6	3,0	22	0,92	0,87
4	1200	3	1,0	24	0,95	0,80
5	2500	7	2,0	25	0,94	0,82
6	1300	4	0,8	15	0,90	0,85
7	1500	5	2,0	18	0,91	0,87
8	2000	6	1,5	17	0,92	0,80
9	1000	3	3,0	20	0,95	0,82
10	1200	7	1,0	22	0,94	0,85
11	2500	4	2,0	24	0,90	0,87

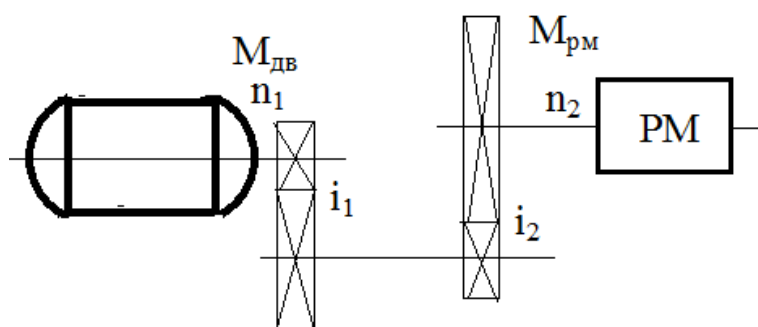
Продолжение табл.

Номер варианта	$m_{гр}$, кг	v , м/с	D_6 , м	i	η_p	η_6
12	1300	5	0,8	25	0,91	0,80
13	1500	6	2,0	15	0,92	0,82
14	2000	3	1,5	18	0,95	0,85
15	1000	7	3,0	17	0,94	0,87
16	1200	4	1,0	20	0,90	0,80
17	2500	5	2,0	22	0,91	0,82
18	1300	6	0,8	24	0,92	0,85
19	1500	3	2,0	25	0,95	0,87
20	2000	7	1,5	15	0,94	0,80
21	1000	4	3,0	18	0,90	0,82
22	1200	5	1,0	17	0,91	0,85
23	2500	6	2,0	20	0,92	0,87
24	1300	3	0,8	22	0,95	0,80
25	1500	7	2,0	24	0,94	0,82

Задача 5

Для системы с двухступенчатой передачей известно: передаточные отношения i_1 и i_2 ; КПД каждой ступени η_1 и η_2 ; статический момент на валу рабочей машины $M_{рм}$; частота вращения рабочего органа машины n_2 . Определить вращающийся момент на валу двигателя $M_{дв}$ и его мощность $P_{дв}$, кВт. Выбрать двигатель по каталогу.

Схема к задаче 5



Номер варианта	$M_{рм}$, Н·м	i_1	i_2	n_2 , об/мин	η_1	η_2
1	10 000	8	2	20	0,97	0,95
2	12 000	5	4	15	0,95	0,96
3	11 000	9	5	10	0,94	0,97
4	14 000	6	6	30	0,92	0,90
5	15 000	10	8	50	0,96	0,87
6	16 000	12	3	60	0,97	0,92
7	13 000	4	2	25	0,95	0,95
8	10 000	5	3	40	0,94	0,96
9	12 000	7	7	15	0,92	0,97
10	11 000	8	6	20	0,96	0,90
11	14 000	5	9	15	0,97	0,87
12	15 000	9	10	10	0,95	0,92
13	16 000	6	2	30	0,94	0,95
14	13 000	10	4	50	0,92	0,96

Продолжение табл.

Номер варианта	$M_{pm}, Н·м$	i_1	i_2	$n_2, об/мин$	η_1	η_2
15	10 000	12	5	60	0,96	0,97
16	12 000	4	6	25	0,97	0,90
17	11 000	5	8	40	0,95	0,87
18	14 000	7	3	15	0,94	0,92
19	15 000	8	2	20	0,92	0,95
20	16 000	5	3	15	0,96	0,96
21	13 000	9	7	10	0,97	0,97
22	10 000	6	6	30	0,95	0,90
23	12 000	10	9	50	0,94	0,87
24	15 000	8	6	25	0,92	0,90
25	16 000	6	7	40	0,96	0,87

Задача 6

Выбрать двигатель по каталогу для подъемного механизма, работающего в циклическом режиме, если известно: КПД передачи η_n , %; радиус барабана R_6 , м; номинальная скорость вращения кранового ДПТ n , об/мин; скорость подъема груза v_n и скорость спуска крюка v_c , м/с; время паузы $t_0 = 15$ с; масса груза, m кг; момент инерции якоря двигателя J , кг·м²; высота подъема h , м. Цикл работы состоит из подъема груза и спуска пустого крюка. Построить нагрузочные диаграммы и тахограмму движения.

Номер варианта	η_n , %	R_6 , м	n , об/мин	v_n , м/с	v_c , м/с	m , кг	J , кг·м ²	h , м
1	80	0,30	460	1,0	2,0	600	0,20	18
2	82	0,30	475	1,2	2,0	650	0,22	15
3	84	0,35	500	1,3	2,0	630	0,23	15
4	85	0,35	525	1,4	2,5	640	0,18	16
5	87	0,25	575	1,5	2,5	610	0,19	16
6	88	0,25	515	1,6	2,5	600	0,20	15
7	90	0,20	550	1,7	2,8	590	0,21	17
8	80	0,25	475	1,8	2,8	580	0,20	17
9	82	0,40	500	1,9	2,8	550	0,22	18
10	84	0,30	525	2,0	3,0	500	0,23	20
11	85	0,30	575	1,0	3,0	500	0,18	20
12	87	0,35	515	1,2	3,0	480	0,19	22
13	88	0,35	575	1,3	3,0	480	0,20	23
14	90	0,25	460	1,4	3,0	560	0,21	18
15	80	0,25	475	1,5	3,5	570	0,20	20
16	82	0,20	500	1,6	3,5	400	0,22	25
17	84	0,25	525	1,7	3,5	400	0,23	20
18	85	0,40	550	1,8	3,5	390	0,18	25
19	87	0,30	515	1,9	3,5	410	0,19	18
20	88	0,30	550	2,0	3,5	380	0,20	25
21	90	0,30	525	2,0	3,0	480	0,18	17
22	80	0,35	575	1,0	3,0	560	0,19	18
23	82	0,35	515	1,2	3,0	570	0,20	20
24	84	0,25	550	1,3	3,5	400	0,21	20
25	85	0,25	475	1,4	3,5	400	0,20	22
26	87	0,20	500	1,5	3,5	390	0,22	23

Задача 7

По расчетной мощности выбрать по каталогу АД, предназначенный для привода механизма в повторно-кратковременном режиме работы. Построить нагрузочную диаграмму, провести проверку по перегрузочной способности.

Номер варианта	M_1 , Н·м	M_2 , Н·м	M_3 , Н·м	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_0 , с	$n_{\text{ном}}$, об/мин	k_u
1	80	40	60	10	5	20	25	1410	0,95
2	120	100	95	10	10	15	55	930	0,90
3	50	20	30	10	15	10	5	915	0,85
4	150	125	145	10	20	10	60	930	0,95
5	150	130	160	10	25	20	35	1415	0,90
6	40	30	10	5	15	20	10	930	0,85
7	40	25	20	5	15	15	5	1420	0,95
8	30	15	25	5	20	10	25	930	0,90
9	20	15	10	5	10	5	60	935	0,85
10	180	140	150	5	15	15	25	1440	0,95
11	30	20	10	15	10	20	5	1440	0,90
12	30	40	60	15	5	15	5	1400	0,85
13	30	45	20	15	10	10	5	1410	0,95
14	30	50	30	15	15	10	10	940	0,90
15	200	180	170	15	20	5	60	930	0,85
16	220	230	215	10	15	10	25	940	0,95
17	20	15	25	10	10	15	5	930	0,90
18	20	45	40	10	5	10	75	950	0,85
19	25	20	15	10	15	15	60	950	0,95
20	20	25	15	10	10	5	20	1440	0,90
21	60	80	40	5	5	10	5	915	0,85
22	50	70	100	15	10	5	5	930	0,95
23	35	70	35	10	10	15	5	1415	0,90
24	40	60	80	20	10	20	10	1440	0,95
25	70	50	70	5	10	10	20	1440	0,90
26	100	120	200	15	10	5	20	1400	0,85

M_1 , M_2 , M_3 – моменты нагрузки на валу для соответствующих участков графика нагрузки, t_1 , t_2 , t_3 – время работы двигателя с заданными моментами нагрузки, t_0 – время паузы, n – частота вращения двигателя, k_u – коэффициент, учитывающий возможное снижение напряжения сети.

Тип двигателя	M_{η^*}	$M_{\max^*}$	$S_{\text{ном}}$	ПВ = 25%			ПВ = 40%			ПВ = 60%			ПВ = 100%		
				$P_{\text{ном}},$ кВт	$\eta, \%$	$\cos\varphi$	$P_{\text{ном}},$ кВт	$\eta, \%$	$\cos\varphi$	$P_{\text{ном}},$ кВт	$\eta, \%$	$\cos\varphi$	$P_{\text{ном}},$ кВт	$\eta, \%$	$\cos\varphi$
4AC71A4Y3	2,0	2,2	8,2	0,65	67,0	0,76	0,6	68,0	0,73	0,6	68,0	0,73	0,60	68,0	0,73
4AC71B4Y3	2,0	2,2	8,7	0,9	68,0	0,77	0,8	68,5	0,75	0,8	68,5	0,75	0,70	69,0	0,74
4AC80A4Y3	2,0	2,2	5,6	1,3	68,5	0,82	1,3	68,5	0,82	1,1	70,0	0,8	0,95	70,5	0,79
4AC80B4Y3	2,0	2,2	5,5	1,9	69,5	0,83	1,7	70,0	0,82	1,5	70,5	0,8	1,3	71,0	0,79
4AC90L4Y3	2,0	2,2	5,8	2,4	76,0	0,82	2,4	76,0	0,82	2,2	76,5	0,8	1,9	77,0	0,78
4AC100S4Y3	2,0	2,2	4,2	3,7	76,0	0,84	3,2	76,5	0,82	2,8	77,0	0,8	2,3	77,5	0,78
4AC100L4Y3	2,0	2,2	4,1	5,0	77,0	0,84	4,3	78,0	0,82	3,8	79,0	0,8	3,3	80,0	0,78
4AC112M4Y3	2,0	2,2	5,6	6,7	77,5	0,84	5,6	79,0	0,83	5,0	80,0	0,81	4,2	81,0	0,78
4AC132S4Y3	2,0	2,2	6,9	9,5	82,0	0,85	8,5	82,5	0,85	7,5	83,5	0,83	7,1	84,0	0,81
4AC132M4Y3	2,0	2,2	6,1	14,0	83,0	0,86	11,8	84,0	0,85	10,5	84,5	0,83	9,0	85,0	0,81
4AC160S4Y3	2,0	2,2	6,1	19,0	83,5	0,86	17,0	84,5	0,86	15,0	85,5	0,85	13,0	86,0	0,78
4AC160M4Y3	2,0	2,2	5,3	23,0	86,0	0,86	20,0	87,0	0,87	18,5	87,5	0,87	17,0	88,0	0,86
4AC180S4Y3	2,0	2,2	5,7	24,0	84,5	0,87	21,0	86,0	0,92	20,0	86,5	0,92	19,0	87,0	0,92
4AC180M4Y3	2,0	2,2	4,4	30,0	87,0	0,93	26,5	88,5	0,91	25,0	89,0	0,91	24,0	89,5	0,91
4AC200M4Y3	2,0	2,2	5,7	35,0	87,0	0,92	31,5	87,5	0,92	28,0	88,0	0,92	26,0	88,0	0,92
4AC200L4Y3	2,0	2,2	5,8	47,0	88,0	0,93	40,0	89,0	0,93	37,0	89,5	0,93	35,0	90,0	0,93
4AC225M4Y3	2,0	2,2	5,8	55,0	87,0	0,94	50,0	87,5	0,92	45,0	88,0	0,92	40,0	88,5	0,92
4AC250S4Y3	2,0	2,2	6,3	43,0	87,0	0,93	56,0	87,5	0,92	53,0	88,0	0,92	50,0	88,0	0,92
4AC250M4Y3	2,0	2,2	6,4	71,0	86,5	0,93	63,0	87,0	0,93	60,0	87,0	0,93	56,0	87,5	0,93
4AC71A6Y3	2,0	2,1	10,4	0,4	62,5	0,94	0,4	62,0	0,70	0,4	62,5	0,70	0,4	62,5	0,70
4AC71B6Y3	2,0	2,1	10,2	0,65	65,0	0,70	0,63	65,0	0,70	0,65	65,0	0,70	0,5	63,5	0,62
4AC980A6Y3	2,0	2,1	7,0	0,9	61,0	0,70	0,8	61,0	0,68	0,7	61,0	0,64	0,5	60,0	0,51
4AC80B6Y3	2,0	2,1	7,8	1,3	65,6	0,72	1,2	66,5	0,73	1,1	67,5	0,71	0,8	69,0	0,64
4AC90L6Y3	1,9	2,1	6,2	1,8	70,0	0,75	1,7	71,0	0,72	1,3	71,5	0,65	1,1	72,0	0,60
4AC100L6Y3	1,9	2,1	5,3	2,9	74,0	0,74	2,6	75,0	0,76	2,2	76,0	0,72	1,8	76,5	0,67

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор электродвигателя для промышленного использования – это комплексная задача, требующая учета множества факторов. Важно правильно определить тип двигателя, его мощность, условия эксплуатации и эффективность работы. Понимание этих аспектов поможет вам выбрать лучший вариант для решения конкретной производственной задачи, снизить операционные расходы и обеспечить стабильную работу оборудования на долгие годы.

ДПТ отличаются высоким пусковым моментом и стабильной работой в условиях больших перегрузок. Приводы постоянного тока чаще всего применяются в металлургии и станкостроении, устанавливаются на электротранспорт.

Синхронные двигатели – оптимальное решение для оборудования с постоянной скоростью работы: генераторов постоянного тока, компрессоров, насосов и др.

К преимуществам оборудования данного типа относятся высокий КПД. Эксплуатация синхронных электродвигателей позволяет сократить потери электричества в сети до минимума.

Асинхронные электродвигатели получили наибольшее распространение в промышленном производстве. Они удовлетворяют требованиям разных промышленных применений:

- Для лифтов и другого оборудования, требующего ступенчатого изменения скорости, выпускаются многоскоростные асинхронные приводы.
- При эксплуатации лебедок и металлообрабатывающих станков используются электродвигатели с электромагнитной тормозной системой. Это обусловлено необходимостью остановки привода и фиксации вала при перебоях напряжения или его исчезновения.
- В процессах с пульсирующей нагрузкой или при повторно-кратковременных режимах могут использоваться асинхронные электродвигатели с повышенными параметрами скольжения.

В технологических процессах, требующих управления положением ротора применяют шаговый электродвигатель. При необходимости устанавливать и фиксировать рабочий орган оборудования в заданных положениях, перемещать его в соответствии с заданной программой используют серводвигатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зарандия, Ж. А.** Электрические машины и электропривод в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ж. А. Зарандия, Е. А. Печагин, Н. П. Моторина. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – URL : <http://tstu.ru/book/elib1/exe/2018/Zarandya.exe>
2. **Ванурин, В. Н.** Электрические машины [Электронный ресурс] : учебник / В. Н. Ванурин. – СПб. : Лань, 2016. – 304 с. – URL : <http://e.lanbook.com/book/72974>
3. **Никитенко, Г. В.** Электропривод производственных механизмов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Г. В. Никитенко. – СПб. : Лань, 2013. – 208 с. – URL : <http://e.lanbook.com/book/5845>
4. **Зарандия, Ж. А.** Основы электропривода [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ж. А. Зарандия, А. В. Кобелев, В. В. Клитинов. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2021. – URL : <http://tstu.ru/book/elib1/exe/2021/Zarandya.exe>

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ	5
2. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	14
3. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	22
4. НОМИНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	33
5. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО РОДУ ТОКА	40
6. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ	47
7. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	51
8. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ТИПУ НАГРУЗКИ	64
ЗАДАЧИ	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	78
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	79

Учебное электронное издание

ЗАРАНДИЯ Жанна Александровна
КОБЕЛЕВ Александр Викторович

ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова
Графический и мультимедийный дизайнер Т. Ю. Зотова
Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбаровой

ISBN 978-5-8265-3016-0



Подписано к использованию 07.04.2026.
Тираж 50 шт. Заказ № 48

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская,
д. 106/5, помещение 2, к. 14
Телефон 8(4752)63-81-08.
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru