

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2012 ЛАНЬ®

**А. П. ЕПИФАНОВ, Л. М. МАЛАЙЧУК
А. Г. ГУЩИНСКИЙ**

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Под редакцией А. П. ЕПИФАНОВА

РЕКОМЕНДОВАНО
УМО вузов Российской Федерации
по агроинженерному образованию
в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений, обучающихся
по специальности «Электрификация
и автоматизация сельского хозяйства»

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •
МОСКВА •
КРАСНОДАР •
2012 •



ББК 40.76я73

Е 67

Епифанов А. П., Малайчук Л. М., Гуцинский А. Г.
Е 67 Электропривод: Учебник / Под ред. А. П. Епифанова. — СПб.: Издательство «Лань», 2012. — 400 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-1234-1

В книге рассмотрены общие вопросы электропривода, а также электропривод основных сельскохозяйственных машин, механизмов и агрегатов: центрифуги, транспортеры, насосы и вентиляторы, крановые механизмы и машины с кривошипно-шатунным механизмом, машины для приготовления и раздачи кормов, пилорамы.

Учебник предназначен для студентов аграрных высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Агроинженерия» (профиль «Электрооборудование и электротехнологии»), направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Энергообеспечение предприятий»), направлению «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»).

ББК 40.76я73

Рецензенты:

М. А. ТАРАНОВ — доктор технических наук, профессор, ректор ФГОУ ВПО «Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия», зав. кафедрой эксплуатации электроэнергетического оборудования и электрических машин, член-корреспондент Россельхозакадемии, заслуженный работник Высшей школы РФ;
Р. С. АИПОВ — доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин и электрооборудования, декан энергетического факультета ФГОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет».

Обложка

Е. А. ВЛАСОВА

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

- © Издательство «Лань», 2012
- © Коллектив авторов, 2012
- © Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2012



ПРЕДИСЛОВИЕ

Сельское хозяйство, как никакая другая отрасль, характеризуется широким спектром применяемых машин и механизмов, отличающихся видами и параметрами движения исполнительного органа, режимами и условиями работы, приводными характеристиками. Широкое разнообразие машин во многом определяет и типы приводов: гидравлический, пневматический, механический, от вала отбора мощности, электрический. При этом использование электропривода, регулируемого и автоматизированного, неуклонно расширяется в силу известных его преимуществ. Следовательно, знаниями по электроприводу в рамках необходимого должны владеть не только специалисты-электрики, но и механики.

Методически учебник строится по принципу — основы электропривода и электропривод машин и механизмов сельскохозяйственного назначения, объединенных в группы: насосы и вентиляторы, центрифуги, грузоподъемные машины, транспортеры, машины с кривошипно-шатунным механизмом, кормоприготовительные машины, деревообрабатывающие механизмы (пилорамы). Для каждой из групп машин выделены особенности их работы по приводным характеристикам, выбору мощности электродвигателя, возможности применения частотно-регулируемых асинхронных приводов, устройств плавного пуска, рассмотрены возможности использования линейных приводов.

Содержание учебника соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта по дисциплине

СД-0.5 «Электропривод» для студентов специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», направление 110300 «Агроинженерия».

При написании учебника использовались работы известных ученых и специалистов: М. Г. Чиликина, С. А. Ковчина, В. В. Москаленко, И. Ф. Ильинского, И. Я. Браславского, А. П. Фоменкова, В. А. Буторина, Б. И. Вагина, Г. М. Грачева, Р. С. Аипова, А. С. Знаева, А. В. Цупака и др., а также материалы авторского коллектива.

В Приложении приведены данные по физическим свойствам материалов, характеристики помещений, машин, аппаратов.

Предлагаемый учебник является продолжением учебных пособий «Основы электропривода» и «Электропривод в сельском хозяйстве», вышедших в 2008, 2010 гг. и оказавшихся востребованными среди студентов и специалистов.

В результате изучения и освоения дисциплины «Электропривод» у будущих специалистов будут сформированы следующие профессиональные компетенции:

- решение инженерных задач применения систем электропривода с использованием основных законов механики и электротехники, знание устройства и правил эксплуатации электроустановок;
- выбор элементов привода: типа и параметров электродвигателя, преобразователей электроэнергии, элементов защиты, аппаратов управления;
- оптимальный выбор системы электропривода с точки зрения энерго- и ресурсосбережения, повышения энергоэффективности.

Все замечания и пожелания по содержанию книги будут с благодарностью приняты по адресу: 196608, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, энергетический факультет, кафедра электрических машин и электропривода.



ВВЕДЕНИЕ

Резкий рост цен на мировых рынках продовольствия в 2007–2008 гг. явился следствием копившихся в последние годы проблем не только сельского хозяйства, а всего социально-экономического комплекса мирового хозяйства. К ним можно отнести: динамичное развитие экономик стран Азии и возросшее потребление мясомолочных продуктов; рост себестоимости продукции АПК за счет удорожания энергоносителей; низкие урожаи зерновых в некоторых странах; рост населения; увеличивающийся отток продукции полеводства на производство биотоплива и др. Эти процессы затронули и экономику России, которая, по данным Госкомстата, импортирует значительную часть продовольствия (до 40%). Поэтому со стороны государства предпринимаются меры по укреплению внутреннего продовольственного рынка, снижению зависимости от импорта, развитию села и новых форм хозяйствования. Они уже привели к снижению импорта мясных и молочных продуктов, особенно свинины и мяса птицы.

Поставленные перед АПК задачи призваны не только обеспечить население страны качественными продуктами, но и повысить ее роль на мировом рынке продовольствия. Для этого необходимо:

- 1) существенно увеличить производство основных видов продукции, особенно зерна (валовой сбор, обеспечивающий независимость от импорта, должен быть около 1 т на человека, т. е. около 150 млн т. В нашей стране в последние годы он составил 80–100 млн т);

2) проводить на селе технологическое перевооружение, развивать лизинг, долгосрочное кредитование;

3) обеспечить стабильность цен на горючее и электроэнергию, уменьшить дисбаланс цен на продукцию промышленности (машиностроение), минеральные удобрения, строительные материалы, с одной стороны, и сельского хозяйства — с другой;

4) создать современный рыночный механизм регулирования цен на сельскохозяйственную продукцию при ее экологической чистоте;

5) развивать инфраструктуру, жилищное строительство, бытовые условия, чтобы сделать жизнь и работу на селе привлекательной для людей.

Решение поставленных задач лежит на путях перехода к интенсивным методам производства, комплексной механизации и электрификации технологических процессов с внедрением современного оборудования. При этом широкое использование автоматизированного электропривода позволит повысить производительность труда, улучшить качество за счет более высокой степени управляемости технологическими процессами. Сказанное одинаково характерно для животноводства и птицеводства, послеуборочной обработки зерна и тепличных комплексов, переработки молока, приготовления и раздачи кормов, водоснабжения, систем обеспечения микроклимата помещений. В полеводстве наблюдается внедрение систем электропривода, работающих от установленных на борту машин источников электроэнергии.

Комплектация электроприводов в сельском хозяйстве производится стандартными блоками: электродвигатель, редуктор, преобразователь параметров электроэнергии (УВ, ТРН, ШИР, ПЧ), алгоритмы и схемы управления.

Используемые машины и механизмы во многих случаях те же самые, что и в других отраслях народного хозяйства:

- центрифуги, основной особенностью которых является большой приведенный момент инерции;
- насосы и вентиляторы, центробежные и лопастные, для систем водоснабжения, полива, орошения, доиль-

ных установок, обеспечения микроклимата, обработки и сушки зерна. Объединенные в категорию «Турбомеханизмы», они имеют сходные механические характеристики;

- подъемно-транспортные: грузоподъемные механизмы циклического (краны) и непрерывного (транспортеры) действия;
- машины с кривошипно-шатунным механизмом, применяемые для преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное: поршневые насосы, компрессоры, пилорамы, различного рода вибромеханизмы сельскохозяйственных машин;
- машины для приготовления кормов: дробилки, клубне-резки, прессы и т. д. (обладают особенностями всех приводных характеристик, поэтому выделены в отдельную группу).

Специфика электроприводов в сельском хозяйстве определяется, прежде всего, разнообразием приводных характеристик, режимами и условиями работы (окружающая среда, качество электроэнергии). Следовательно, выбору систем электропривода с целью обеспечения требуемых характеристик должно уделяться особое внимание.

Основным типом электропривода в сельском хозяйстве, как нерегулируемого, так и регулируемого, является привод переменного тока на основе короткозамкнутого асинхронного двигателя. Нерегулируемый электропривод широко используется в насосных и вентиляторных установках, работающих в длительном режиме с неизменной подачей, многих грузоподъемных машинах и транспортерах, пилорамах, молочных сепараторах, различных сельскохозяйственных машинах с вибромеханизмами. При этом пуск осуществляется прямым включением в сеть или с использованием устройств плавного пуска на основе тиристорных регуляторов напряжения для снижения динамических нагрузок и при недостаточной мощности сети.

Регулируемый привод по системе «асинхронный двигатель — преобразователь частоты» все шире внедряется в системах водо- и теплоснабжения, воздухоудувках, дымососах и других механизмах при работе с переменной

производительностью. Такие системы позволяют решить вопросы регулирования скорости, пуска с минимальными потерями, являясь мощным энерго- и ресурсосберегающим средством. Кормоприготовительные машины оборудуются также регулируемым приводом с целью снижения энергоемкости конечного продукта. Альтернативным вариантом являются многоскоростные асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов.

В качестве серводвигателей мобильных машин в полеводстве используются вентильные двигатели (синхронный двигатель с постоянными магнитами плюс вентильный коммутатор).

В деревообрабатывающей сфере широко применяются асинхронные электроприводы (токарные станки, фрезерные, рубанки, фуганки и др.), как нерегулируемые, так и регулируемые — по системе ПЧ–АД, а при малых мощностях (ручной инструмент) — однофазные коллекторные машины.

Для теплиц и животноводческих комплексов перспективными представляются монорельсовые транспортные средства, в том числе с линейным асинхронным приводом.

В целом широкое применение автоматизированного электропривода в сельском хозяйстве позволит повысить производительность труда и конкурентоспособность отечественной продукции.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Под электроприводом понимают электромеханическую систему, состоящую из электродвигательного, преобразовательного и управляющего устройств, предназначенную для приведения в движение исполнительных органов (ИО) рабочей машины и управления этим движением. Иными словами, электропривод — это управляемое электромеханическое преобразование энергии [1, 2, 3, 4, 5].

Основным элементом электропривода (ЭП) является электродвигатель, который преобразует электрическую энергию в механическую (в тормозных режимах наоборот — механическую энергию в электрическую). Управление электроприводом с целью обеспечения требуемого характера движения в оптимальных режимах работы машин по производительности, точности, экономичности осуществляется с помощью соответствующих преобразовательных и управляющих устройств, определяющих работу непосредственно электродвигателя.

Структурная схема автоматизированного электропривода приведена на рис. 1.1 [3]. Основные элементы схемы:

ИЭЭ — источник электрической энергии (ЭЭ): сеть переменного или постоянного тока, автономный источник электроэнергии — дизель-генератор, аккумуляторная батарея и т. д.

ПУ — преобразовательное устройство, предназначено для питания двигателя электроэнергией с различными параметрами (напряжение U и частота f при переменном

токе, напряжение U — при постоянном). На практике используются: выпрямители, управляемые (УВ) и неуправляемые (НУВ); широтно-импульсные преобразователи (ШИП); тиристорные регуляторы напряжения (ТРН); преобразователи частоты (ПЧ) для питания асинхронных и синхронных двигателей и др.

ЭД — электрический двигатель постоянного или переменного (асинхронный, синхронный) тока; вращающийся, шаговый, линейный, электромагнитный; преобразует электрическую энергию (ЭЭ) в механическую (МЭ).

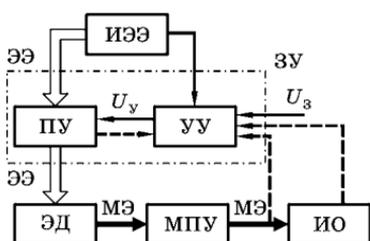


Рис. 1.1

Структурная схема автоматизированного электропривода

УУ — устройство, управляющее работой ПУ по командным сигналам задающего устройства (ЗУ) и обратных связей о состоянии электропривода и технологического процесса. В УУ сигналы обратных связей сравниваются с заданными и при наличии рассогласования вырабатывается сигнал, воздействующий на преобразователь ПУ, электродвигатель ЭД, устраняя, таким образом, рассогласование.

УУ состоит из аппаратов управления и защиты, а также электронных и микропроцессорных устройств управления. Совокупность информационных (датчики технологических, механических, электрических величин и др.) и управляющих устройств образует информационный канал электропривода, предназначенный для управления переменными величинами (координатами) привода в соответствии с требованиями технологического процесса.

Не менее важной функцией УУ является реализация процесса с минимальными затратами электроэнергии. УУ (рис. 1.1) называется *регулятором*.

Перечисленные выше элементы относятся к электрической части привода (ЭЧ).

Механическая часть (МЧ) включает в себя сам рабочий механизм (РМ) или исполнительный орган (ИО), который приводится в движение электродвигателем через

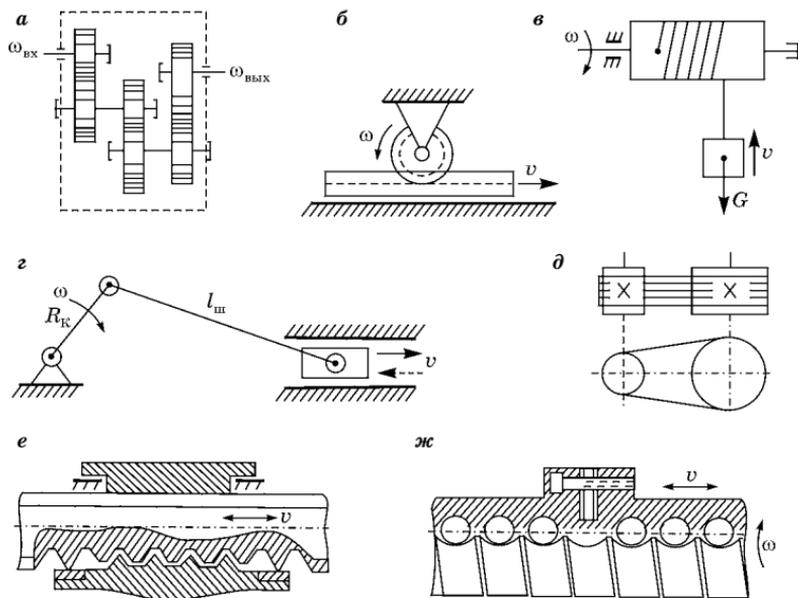


Рис. 1.2

Схемы механических передаточных устройств:

a — редуктор: $\omega_{\text{вх}}$, $\omega_{\text{вых}}$ — скорости входная и выходная соответственно; *б* — зубчато-реечная передача; *в* — барабанно-канатная передача: G — вес груза; *г* — кривошипно-шатунный механизм: $R_{\text{к}}$ — радиус кривошипа; $l_{\text{ш}}$ — длина шатуна; *д* — ременная передача; *е* — винтовая передача; *ж* — шарико-винтовая передача.

механическое передаточное устройство (МПУ). МПУ может изменять вид движения, например вращательное в поступательное или возвратно-поступательное (пара «винт — гайка», кривошипно-шатунный механизм), изменять скорость и момент (редуктор, ременная, цепная и другого вида передача) и т. д. Отметим, что ротор двигателя относится и к механической части, и учитывается при расчетах моментов и сил инерции. На рис. 1.2 приведены схемы механических передаточных устройств.

ЭД, ПУ и МПУ образуют силовой канал электропривода (рис. 1.1). Во всех звеньях силового канала часть энергии теряется (потери), а энергическая эффективность привода обычно оценивается величиной КПД как

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{потр}}} = \frac{P_2}{P_1} = \eta_{\text{пр}} \eta_{\text{эд}} \eta_{\text{мп}}, \quad (1.1)$$

где $\eta_{пр}$, $\eta_{эд}$, $\eta_{мпц}$ — КПД преобразователя, электродвигателя и МПУ соответственно; $P_{пол}$, $P_{потр}$ — полезная и потребляемая мощности.

КПД системы «электропривод — рабочая машина»

$$\eta = \frac{P_{техн}}{P_{потр}} = \eta_{ЭП} \eta_{рм}, \quad (1.2)$$

где $P_{техн}$ — технологически необходимая мощность для выполнения производственного процесса; $\eta_{рм}$ — КПД рабочей машины; $\eta_{ЭП}$ — КПД электропривода.

При работе на различных скоростях (искусственных характеристиках)

$$\eta_{ЭП} = \frac{W_{пол}}{W_{потр}} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{2i} t_i}{\sum_{i=1}^n (P_{2i} + \Delta P_i) t_i}, \quad (1.3)$$

где $\eta_{ЭП}$ — усредненный КПД привода; P_{2i} , ΔP , t_i — полезная мощность, потери и время работы привода на i -й скорости; n — число участков (по нагрузочной диаграмме); W_2 , W_1 — полезная и потребляемая энергия.

С точки зрения экономичности потребления активной мощности важным является и коэффициент мощности $\cos \varphi$, определяемый как

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (1.4)$$

где P , S , Q — потребляемые активная, полная и реактивная мощности.

Для цикла работы рассчитывается средневзвешенный $\cos \varphi_{св}$

$$\cos \varphi_{св} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{P_i^2 + Q_i^2} \cdot t_i)}. \quad (1.5)$$

Для асинхронных двигателей, работающих от сети переменного тока, произведение $(\eta \cdot \cos \varphi)$ называется энергетическим фактором, и по этому критерию зачастую определяются оптимальные параметры системы [24].

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Электроприводы, используемые в различных технологических установках, разнообразны по своим функциональным возможностям, схемному и конструктивному исполнению, степени автоматизации, что связано с большим разнообразием рабочих машин. Основные признаки, по которым классифицируют электроприводы:

- число рабочих органов, приводимых электроприводом: индивидуальный, групповой;
- вид движения электродвигателя: вращательного, линейного, многокоординатного;
- способ соединения двигателя с рабочим органом: редукторный, безредукторный, конструктивно-интегрированный;
- регулируемость: нерегулируемый, регулируемый;
- основной контролируемый параметр: регулируемый по моменту, регулируемый по скорости, регулируемый по положению;
- вид управления: ручное, полуавтоматическое, замкнутая система автоматического регулирования (САР) скорости с ручным заданием или с заданием от системы управления технологическим процессом, замкнутая САР положения, обеспечивающая точное позиционирование; программное, следящее.

Классификация по числу рабочих органов, приводимых в движение электроприводом. Электроприводы бывают индивидуальными и групповыми. Если каждый рабочий орган машины приводится в действие своим электроприводом, то последний называется индивидуальным. Такой привод может быть однодвигательным либо многодвигательным. При групповом электроприводе один двигатель приводит в движение несколько рабочих органов. При этом усложняется кинематическая цепь рабочей машины и затрудняется управление рабочими органами, так как для отдельного управления необходимо применять специальные механические устройства: управляемые муфты, коробки передач, фрикционы и др. По мере развития техники групповой электропривод все больше вытесняется индивидуальным.

Классификация по виду движения электродвигателя. Наибольшее применение, а до недавнего времени исключительное, получили электроприводы вращательного движения. Сейчас значительное внимание уделяется линейным двигателям. В тех механизмах, где рабочий орган совершает поступательное или возвратно-поступательное движение, применение линейных двигателей конструктивно гораздо удобнее, чем использование специальных кинематических пар: винт-гайка, кривошипно-шатунный механизм и др. Создание новых эффективных конструкций линейных двигателей с питанием от полупроводниковых преобразователей частоты открывает новые возможности использования линейных электроприводов для ряда производственных машин, в том числе и на предприятиях АПК.

Многокоординатные электроприводы на основе специальных шаговых электродвигателей являются отечественной разработкой и находят применение в высокоточных робототехнических установках, сборочных автоматах и используются для других целей. Они позволяют осуществлять пространственные движения рабочего органа по нескольким координатам.

Классификация по способу соединения двигателя с рабочим органом. Электродвигатели соединяются с рабочим органом машины либо непосредственно, либо через редуктор или другую кинематическую передачу. Непосредственное соединение двигателя с рабочим органом характерно для высокоскоростных рабочих машин, например, насосов и вентиляторов. В других рабочих машинах, где скорость рабочего органа меньше (или больше) номинальной скорости электродвигателя, применяются редукторы (или мультипликаторы), которые изменяют скорость и момент на валу рабочего органа.

До 60-х гг. XX в. регулируемые ЭП строились на основе машин постоянного тока. К настоящему времени в связи с разработками и массовым выпуском управляемых полупроводниковых приборов, а на их основе преобразователей частоты, регуляторов постоянного и переменного напряжения основным регулируемым электроприводом стал частотно-

управляемый асинхронный с короткозамкнутым двигателем и вентильный (синхронный двигатель + ПЧ).

Для высокоточных механизмов и машин, работающих в динамических режимах, стремятся исключить механические передачи между валом двигателя и рабочим органом. Такие электроприводы называются безредукторными. При этом, однако, возрастают габаритные размеры и масса приводного двигателя, поскольку при одинаковой его мощности эти параметры примерно обратно пропорциональны номинальной скорости двигателя. В последние годы стремятся, особенно для высокоточных электроприводов, конструктивно объединить рабочий орган с приводным электродвигателем. Примерами таких конструктивно интегрированных электроприводов являются электрошпиндели (для шлифовальных станков), мотор-колеса (для транспортных средств), мотор-редукторы и др.

Новым направлением в технике является создание мехатронных модулей — электромеханических модулей, включающих в себя рабочий орган, электромеханическое устройство (двигатель) с системой его регулирования (ПЧ, ШИП и др.) и микропроцессорное управляющее устройство. Такие модули применяются в роботах и на станках с числовым программным управлением.

Классификация по регулируемости. Под регулируемостью понимается возможность изменения или точного поддержания скорости, ускорения или момента (усилия) приводного электродвигателя.

Исторически сложилось, что большинство существующих электроприводов выполнено на базе короткозамкнутых асинхронных электродвигателей, не допускающих в стандартной схеме их питания регулирования скорости или момента. Модификацией односкоростных асинхронных электродвигателей являются двух- и трехскоростные двигатели. Электроприводы с многоскоростными двигателями дают возможность получать две или три фиксированные рабочие скорости, но не могут обеспечить их плавного регулирования в заданном диапазоне. По плавности регулирования приводами можно также отнести электроприводы с реостатно-контакторным управлением.

В приводах центрифуг при частотах вращения до 10 000 об/мин используются редукторы с передаточным числом $i = \frac{n_{дв}}{n_{рo}} < 1$, так называемые мультипликаторы.

Регулируемый электропривод выполняет следующие функции:

- установка требуемой скорости в заданном диапазоне;
- стабилизация установленного значения скорости с заданной точностью при возмущающих воздействиях, например изменении нагрузки на валу двигателя;
- регулирование момента, развиваемого двигателем в двигательном и тормозном режимах, и ускорения (замедления) привода;
- формирование требуемого характера изменения скорости во времени $\omega = f(t)$ с заданной точностью.

В настоящее время все более широкое применение получают регулируемые электроприводы.

Классификация по основному контролируемому параметру. В зависимости от технологических требований электропривод должен осуществлять регулирование по одной из главных контролируемых величин (координат): моменту, скорости или положению рабочего органа машины. При этом регулируются и другие величины, например при регулировании положения необходимо регулировать скорость и т. п.

Регулирование момента как основной регулируемой величины характерно для тех производственных машин, где контролируется натяжение обрабатываемого материала: намоточных устройств, линий обработки ткани и др. Часто такой величиной является скорость: для механизмов главного движения станков, клетей прокатных станов, конвейеров, питателей, насосов и многих других машин в соответствии с технологическим процессом требуется ее регулирование. Есть механизмы, для которых необходимо позиционирование рабочего органа или перемещение его по заданной траектории. Такие электроприводы управляются по положению (лифты, подъемные краны).

Классификация электроприводов по виду управления. Электроприводы с системами управления различаются по

их функциональным возможностям и сложности. Наиболее простые системы с ручным управлением характерны для нерегулируемых электроприводов. В таких системах используется релейно-контакторная аппаратура, выполняющая функции пуска, останова, защиты и блокировки.

В электроприводах с полуавтоматическим управлением предполагается управление оператором с помощью командоконтроллера, кнопок управления и других аппаратов. Система управления содержит элементы управления и регулирования, обеспечивающие автоматическое изменение параметров электропривода (например, переключение ступеней сопротивления пускового реостата в функции тока или времени) в соответствии с командами оператора. Такие системы характерны, например, для электроприводов грузоподъемных кранов, электротранспорта. При регулируемом электроприводе, как правило, используются замкнутые САР по току и скорости.

Если задающее воздействие на параметры движения рабочего органа формируется программными средствами, то такие электроприводы называются электроприводами с числовым программным управлением (ЧПУ). Приводы с ЧПУ содержат замкнутые контуры регулирования по скорости и положению.

Когда положение рабочего органа должно изменяться в соответствии с заданием, характер которого заранее неизвестен, то функцией электропривода в этом случае является слежение и обработка этого задания с необходимой точностью. Такой электропривод называется следящим.

1.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ И ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Для управления движением исполнительных органов рабочих машин и обеспечения режимов работы самого электропривода необходимо регулирование ряда переменных (координат): скорости, ускорения, угла поворота ИО рабочей машины, момента двигателя и др.

Примером регулирования переменных может служить привод пассажирского лифта. В данном случае требуется

выдерживать допустимые ускорение и замедление при пуске и остановке, точную остановку кабины на заданном этаже, регулирование скорости. Такое управление обеспечивается регулированием соответствующих координат лифта путем целенаправленного воздействия на двигатель.

Основными регулируемыми координатами ЭП являются скорость, положение (угол поворота) и момент двигателя.

Регулирование скорости исполнительных органов рабочих машин может быть в виде стабилизации при изменении момента сопротивления, изменения ее в соответствии с задающим сигналом или по заданной программе. Количественно оно характеризуется следующими основными показателями [2, 3, 4, 5]:

1. Диапазон регулирования D определяется отношением максимальной и минимальной скоростей $D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$ при заданных пределах изменения момента на валу. На практике работают электроприводы с диапазоном регулирования от 2÷4 до 1000 и более. В зависимости от диапазона регулирования скорости различаются:

- приводы с ограниченным диапазоном (не более 2:1);
- приводы общего назначения с диапазоном не выше 100:1;
- широкорегулируемые электроприводы (диапазон порядка 1000:1);
- высокоточные электроприводы (диапазон 10 000:1 и выше).

2. Направление регулирования определяется расположением получаемых искусственных характеристик относительно естественной. Если они находятся выше основной, говорят о регулировании вверх, если ниже — вниз. Когда искусственные характеристики располагаются выше и ниже естественной, то регулирование называется двухзонным.

3. Плавность регулирования оценивается отношением скоростей на двух ближайших характеристиках, $K_{\text{пл}} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}}$. Очевидно, что $K_{\text{пл}}$ зависит от способов регулирования

параметров или напряжения и частоты на выходе ПУ (см. рис. 1.1).

4. Стабильность скорости характеризуется изменением ее при колебаниях момента на валу и определяется величиной жесткости характеристики двигателя: чем выше жесткость, тем больше стабильность.

5. Экономичность регулирования зависит от затрат на создание привода и его эксплуатацию. Важнейшим показателем здесь являются потери энергии, связанные именно с регулированием, а также КПД привода при работе на разных скоростях (см. 1.1–1.5).

6. Допустимая нагрузка двигателя ограничена предельной допустимой температурой изоляции обмоток. При работе на естественной характеристике — это номинальные момент и потери, а на искусственных характеристиках нагрузка ограничена значением номинального тока, определяющего потери в обмотках.

Управление координатами привода осуществляется целенаправленным воздействием на двигатель с помощью системы управления, содержащей силовой преобразователь и управляющее устройство (см. рис. 1.1). При этом ПУ выдает нужное значение напряжения или напряжения и частоты для поддержания заданной величины выходной координаты.

Системы управления делятся на неавтоматизированные и автоматизированные.

Неавтоматизированные системы применяются в основном в нерегулируемых приводах, операции по управлению осуществляются вручную (прямой пуск асинхронного двигателя при питании от сети, остановка).

В автоматизированных системах оператор дает команду только на начало и конец работы, а все остальные операции обеспечивает система управления. Такие системы делятся на разомкнутые (рис. 1.3а) и замкнутые (рис. 1.3б, в, г).

В разомкнутой системе изменение внешних возмущений $x_{\text{возм}}$ (нагрузки и др.) сказывается на выходной величине $x_{\text{вых}}$ (например, скорости ω , связанной с моментом механической характеристикой $\omega(M)$). Такая система

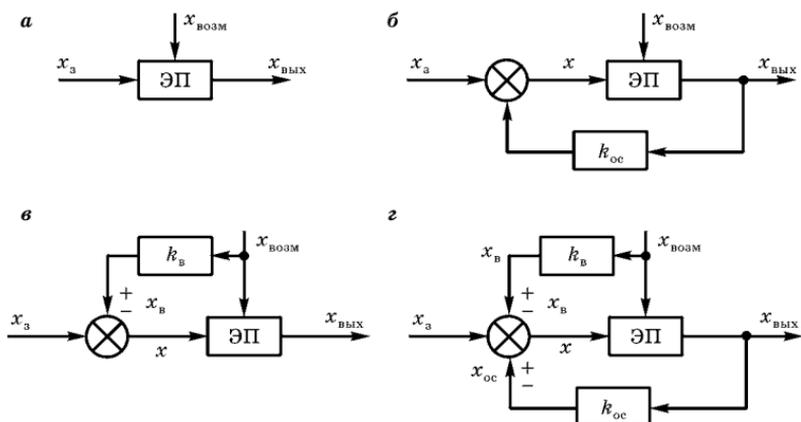


Рис. 1.3

Принципы построения разомкнутых и замкнутых систем управления электроприводами:

a — схема разомкнутой системы; *б* — замкнутая система с обратной связью, построенной по принципу компенсации отклонения; *в* — схема замкнутой системы, построенной по принципу компенсации возмущения; *з* — комбинированная схема замкнутой системы.

не обеспечивает регулирование выходной величины при $x_{возм} = \text{var}$, так как информация о ее значении не поступает на вход системы. Это является наиболее существенным недостатком данных систем, но из-за простоты, дешевизны и надежности они широко используются при автоматизации процессов пуска, торможения, реверса электроприводов.

В замкнутых системах, или системах с обратной связью, влияние возмущающего воздействия $x_{возм}$ на выходную координату $x_{вых}$ частично или полностью устраняется путем подачи с выхода на вход информации о величине $x_{вых}$ (система с обратной связью, рис. 1.3б) или компенсацией возмущающего воздействия (рис. 1.3в), или в комбинированной системе (рис. 1.3з).

Все виды обратных связей (ОС) в замкнутом ЭП делятся на положительные и отрицательные, линейные и нелинейные, жесткие и гибкие. Сигнал положительной ОС направлен согласно с сигналом задания, а отрицательной — встречно, т. е. вычитается.

Жесткая ОС действует в установившихся и переходных режимах ЭП. Сигнал гибкой ОС вырабатывается только в переходных режимах.

Линейная ОС характеризуется пропорциональной зависимостью между регулируемой координатой и сигналом обратной связи, в нелинейной связи эта зависимость нелинейна.

В зависимости от вида регулируемой величины в ЭП используются указанные выше связи по скорости, положению, току, напряжению, ЭДС, магнитному потоку.

Системы с обратной связью, работающие по отклонению, применяются наиболее широко, сигнал обратной связи x_{oc} , пропорциональный $x_{вых}$, суммируется с сигналом задания $x_з$ (или вычитается), а результирующий сигнал x с выхода сумматора является входным управляющим сигналом для электропривода. Этот сигнал называется *рассогласованием*. В итоге напряжение с выхода ПУ (см. рис. 1.1) меняется в ту или иную сторону, изменяя выходную величину в нужном направлении. Например, для двигателя постоянного тока увеличение момента нагрузки приводит к снижению скорости, сигнал отрицательной обратной связи уменьшается, повышая напряжение преобразователя (УВ, ШИП), а с ним и скорость двигателя, восстанавливая с определенной точностью заданный режим.

По величине установившегося рассогласования различаются системы статические, когда $x \neq 0$, и астатические, когда $x = 0$.

Системы привода со структурой по рис. 1.3в реализуют принцип компенсации возмущающего воздействия. Здесь на сумматор подаются задающий сигнал $x_з$ и пропорциональный возмущению $x_{возм}$. Для работы таких систем нужны датчики, в частности нагрузки. Если же возмущающих воздействий несколько, то столько же нужно и датчиков. Поэтому они применяются редко. Возможны системы комбинированные (рис. 1.3г), когда основное воздействие компенсируется по возмущению, а все остальные — по отклонению.

Многообразие автоматизированных систем управления электроприводами характеризуется типом обратных связей — положительными и отрицательными, жесткими и гибкими, линейными и нелинейными; количеством

регулируемых координат и структурными схемами — с суммирующим усилителем, с общим усилителем и нелинейными обратными связями (отсечками), с подчиненным регулированием координат, когда количество усилителей и замкнутых контуров соответствует числу регулируемых координат. Такое построение системы (подчиненное) позволяет осуществить раздельное регулирование координат и раздельную настройку процесса регулирования [5, 10, 11].

На современном этапе развития техники и технологий в управлении технологическими процессами широко используются ЭВМ. Их применение позволяет быстро обрабатывать большие объемы информации, усложняя сами законы управления, находить и принимать оптимальные решения с учетом большого числа факторов, значительно повышая производительность труда, качество продукции и надежность работы оборудования.

На практике часто требуется обеспечить регулирование нескольких координат ЭП — например, скорости и момента (тока) двигателя. При этом замкнутые САР выполняются по одной из следующих структурных схем [5, 13].

Схема с общим усилителем (рис. 1.4) предназначена для регулирования тока I и скорости ω . Двигатель представлен двумя составляющими — электрической ЭЧД и механической МЧД. Сигналы ОС по току $U_{ост}$ и скорости $U_{осс}$ подаются на вход УУ, где алгебраически суммируются с задающим сигналом $U_{зс}$. Сигнал рассогласования ΔU подается на вход преобразователя ПУ, который выдает нужное напряжение для управления двигателем. Схема отличается простотой реализации, но не позволяет регулировать ток и скорость независимо друг от друга.

Схема с подчиненным регулированием координат (рис. 1.5), в которой регулирование каждой координаты

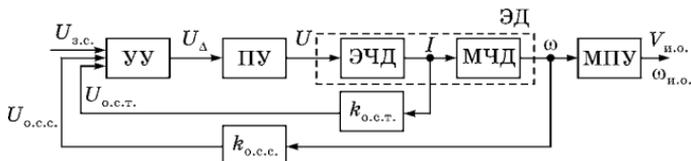


Рис. 1.4

Схема с общим усилителем

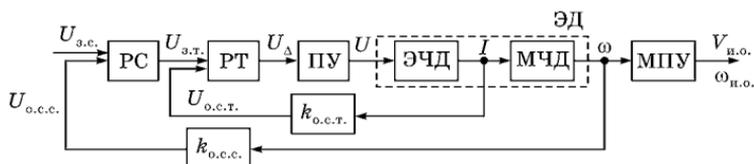


Рис. 1.5

Схема с подчиненным регулированием координат

осуществляется своими регуляторами — тока РТ и скорости РС. Замкнутые контуры располагаются так, что входным, т. е. задающим сигналом для внутреннего контура тока $U_{з.т.}$, является выходной сигнал внешнего по отношению к нему контура скорости. Таким образом, внутренний контур подчинен внешнему контуру скорости — основной регулируемой координате ЭП. Такая схема в настоящее время наиболее часто применяется в ЭП, так как позволяет реализовать оптимальную настройку по каждой координате.

1.4. РЕГУЛЯТОРЫ, ДАТЧИКИ

Силовой канал регулируемого ЭП состоит из электродвигателя и полупроводникового преобразователя, питание с которого непосредственно поступает на двигатель (см. рис. 1.1). Для управления работой преобразователя, т. е. подачей на двигатель требуемого напряжения, частоты, тока в установившихся и переходных режимах, используются регуляторы скорости, момента, положения и др.

Основным звеном аналогового регулятора является операционный усилитель (ОУ), на базе которого создаются различные типы регуляторов и функциональные преобразователи электрических сигналов.

Операционный усилитель (ОУ) (рис. 1.6) представляет собой усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления (до тысячи и более), охваченный отрицательной обратной связью. В такой схеме преобразование осуществляется в соответствии с выражением [13]

$$U_{\text{ВЫХ}} = -Z_{\text{ОС}} \sum_{i=1}^m \frac{U_{\text{ВХ } i}}{Z_{\text{ВХ } i}}, \quad (1.6)$$

где m — количество входов.

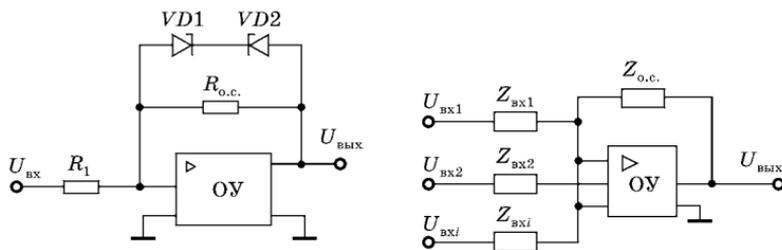


Рис. 1.6

Схемы операционных усилителей:

$Z_{вх1} \dots Z_{вхи}$ — комплексные (в общем случае) входные сопротивления; Z_{oc} — сопротивление обратной связи.

При $m = 1$, когда на вход поступает один сигнал $U_{вх}$, а $Z_{oc} = R_{oc}$ и $Z_{вх1} = R_1$,

$$U_{вх} = R_{oc} \frac{U_{вх}}{R_1} = k U_{вх}. \quad (1.7)$$

В этом случае происходит умножение входного сигнала на коэффициент усиления $k = \frac{R_{oc}}{R_1}$ и изменение знака на противоположный (инвертирование). В случае нескольких сигналов

$$U_{вых} = - \sum_{i=1}^n U_{вхи} k_i. \quad (1.8)$$

Включение во входные цепи и цепи обратных связей емкостей (конденсаторов) ОУ позволяют осуществить и другие преобразования входных сигналов относительно (1.7–1.8) для получения нужных управляющих воздействий на ПУ (см. рис. 1.1). В табл. 1.1 приведены наиболее распространенные схемы регуляторов и их характеристики. Необходимыми элементами регуляторов являются устройства, ограничивающие их выходное напряжение на заданном уровне. На рис. 1.6 — это стабилитроны VD1 и VD2, включенные параллельно ОУ.

В аналоговых системах регулирования ЭП чаще применяются пропорциональные (П-регуляторы), интегральные (И-регуляторы), дифференциальные (Д-регуляторы), аperiodические (А-регуляторы), пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы), пропорционально-дифференциальные (ПД-регуляторы), пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регуляторы).

Таблица 1.1

Схемы регуляторов

Тип регулятора	Схема	Вид преобразования	Параметры регулятора	Переходная функция
П		$U_{\text{ВЫХ}} = kU_{\text{ВХ}}$	$k = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}$	
И		$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{T} \int U_{\text{ВХ}} dt$	$T = R_1 C_{\text{ОС}}$	
Д		$U_{\text{ВЫХ}} = T \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}$	$T = R_{\text{ОС}} C_1$	
А		$U_{\text{ВЫХ}} = kU_{\text{ВХ}} + \frac{1}{T} \int U_{\text{ВХ}} dt$	$k = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}$ $T = R_{\text{ОС}} C_{\text{ОС}}$	
ПИ		$U_{\text{ВЫХ}} = k(U_{\text{ВХ}} + \frac{1}{T} \int U_{\text{ВХ}} dt)$	$k = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}$ $T = R_{\text{ОС}} C_{\text{ОС}}$	
ПД		$U_{\text{ВЫХ}} = k(U_{\text{ВХ}} + T \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt})$	$k = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}$ $T = R_1 C_1$	
ПИД		$U_{\text{ВЫХ}} = k(U_{\text{ВХ}} (1 + \frac{T_2}{T_1}) + T \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt} + \frac{1}{T} \int U_{\text{ВХ}} dt)$	$k = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}$ $T_1 = R_{\text{ОС}} C_{\text{ОС}}$ $T_2 = R_1 C_1$	

Современные преобразователи, например ПЧ для асинхронных приводов, часто комплектуются встроенным регулятором (ПИ, ПИД).

Для работы управляющих устройств (регуляторов) необходима информация о текущих значениях скорости, тока, момента, положения и других координат, которая поступает по каналам обратных связей. Устройства, которые выдают подобную информацию в виде электрических сигналов, называются датчиками.

Датчики времени. При построении релейно-контакторных схем управления электроприводами, реализуемых по принципу времени, в качестве датчиков используют реле времени — электромагнитные, моторные, электронные, анкерные и механические [5, 8, 35].

Электромагнитные реле времени построены на использовании принципа электромагнитной инерции (закона Ленца). Особенностью конструкции является наличие на сердечнике электромагнита короткозамкнутого витка или массивной медной трубки, которые и служат инерционным элементом относительно изменения потока при отключении питания катушки. Такие реле работают на постоянном токе.

Значение выдержки времени (до 5–7 с) регулируется величиной немагнитного зазора: чем больше зазор, тем меньше выдержка.

Моторные (электромеханические) реле времени построены на основе низкоскоростного серводвигателя и редуктора с большим передаточным числом. Установленный на выходном валу редуктора рычаг при вращении замыкает вспомогательные контакты, которые включают выходное реле. Выдержка времени составляет до нескольких минут, часов, суток.

Электронные реле времени строятся на основе дискретных элементов (транзисторы, резисторы, конденсаторы и т. д.) или микросхем, в том числе и логических (рис. 1.7). Имеют выдержку времени от секунд до нескольких часов.

Программные реле времени (например, серии «ТПК») предназначены для включения и выключения различных электротехнических устройств по вводимой пользователем программе.

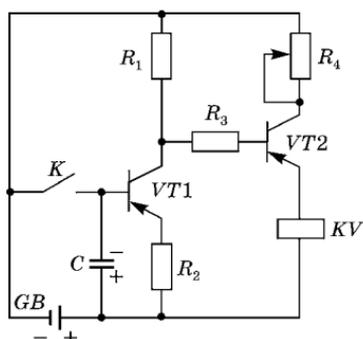


Рис. 1.7
Схема устройства
электронного реле времени

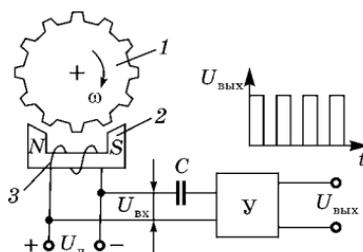


Рис. 1.8
Схема импульсного
тахогенератора

Механические реле времени имеют замедлитель в виде анкерного механизма, управляемого электромагнитом. Такие реле обеспечивают выдержку до нескольких десятков секунд.

Датчики скорости. До настоящего времени для измерения скорости вращения вала двигателя или исполнительного органа широко используются тахогенераторы. Это специальные электрические машины малой мощности, выходное напряжение которых пропорционально скорости вращения: $U_{\text{вых}} = \gamma\omega$, а γ — коэффициент пропорциональности. Основное требование к тахогенераторам — максимальное приближение зависимости $U_{\text{вых}}(\omega)$ к линейной. По своему устройству тахогенераторы бывают постоянного тока и переменного — асинхронные и синхронные [5, 20]. Тахогенераторы постоянного тока и синхронные чаще выполняются с возбуждением от постоянных магнитов.

Импульсный индукционный датчик скорости (рис. 1.8) имеет на валу двигателя или рабочей машины зубчатый диск 1, выполненный из ферромагнитного материала. Постоянный магнит 2 с обмоткой возбуждения 3 расположен напротив зубцов (пазов). При вращении диска изменяется магнитное сопротивление зазора (зубец-паз), в обмотке наводится переменная ЭДС $e = -\frac{d\Psi}{dt}$, которая подается через конденсатор C на усилитель. Частота ЭДС $f = \frac{\omega N}{2\pi}$, где N — число зубцов; ω — угловая скорость вращения.

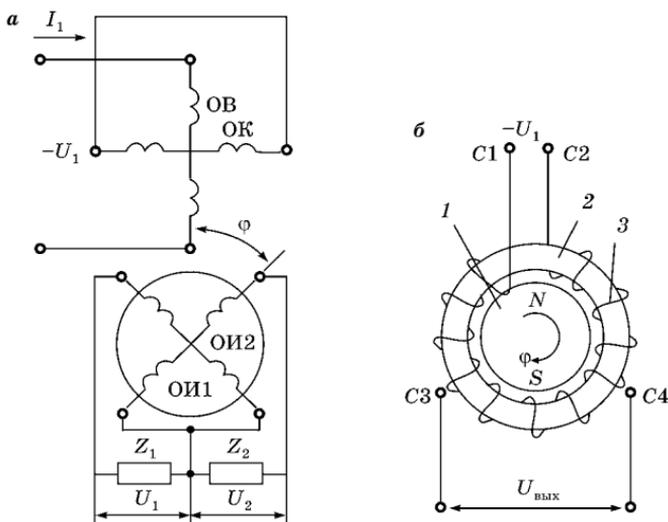


Рис. 1.9
Схемы устройства:

a — синусно-косинусного трансформатора; *б* — магнесина.

Датчики положения. В релейно-контакторных схемах управления ЭП обычно используются путевые и конечные выключатели релейного (контакторного) действия: системы башенного водоснабжения, лифты, грузоподъемные механизмы и др.

Вращающиеся (поворотные) трансформаторы (рис. 1.9) являются аналоговыми датчиками положения (угла поворота) вала и представляют собой индукционную электрическую машину малой мощности. При питании ОВ (статора) от однофазной сети переменного тока в измерительных обмотках ОИ1 и ОИ2, расположенных на роторе взаимно перпендикулярно, наводятся ЭДС. Напряжения $U_1 = U_{1\text{max}} \cdot \sin \varphi$ и $U_2 = U_{2\text{max}} \cdot \cos \varphi$ несут информацию об угле поворота φ вала. Компенсационная обмотка ОК, замкнутая накоротко, служит для компенсации магнитного поля от токов в обмотке ротора.

Датчиками тока для релейно-контакторных схем в большинстве случаев являются токовые реле, максимального или минимального тока [36]. Для получения сигнала, пропорционального току двигателя, применяются, как

правило, шунты. Это калиброванный резистор малого сопротивления, падение напряжения на котором пропорционально току. Обозначение: НШ100А — 75 мВ (нормальный шунт при токе 100 А $\Delta U = 75$ мВ). Для измерения переменных токов и напряжений используются измерительные трансформаторы тока и напряжения [20, 26].

В качестве *датчиков тока и магнитного потока (индукции)*, положения ротора в вентилях приводах широко используются преобразователи Холла [5]. Сам датчик запитывается от стабилизированного источника тока, обеспечивает гальваническую развязку между питающей и выходной цепями. Чувствительность датчика Холла до десятков милливольт на Тесла при питающем токе до (200÷300) мА. Габариты до 2×2×0,35 мм. На их основе выпускаются приборы — тесламетры для измерения индукции в зазорах машин и аппаратов.

Датчики давления в большинстве своем преобразуют перемещение мембраны (усилие, действующее на мембрану, пропорционально давлению) в изменение электрической емкости или индуктивности. Сами датчики при этом называются емкостными или индуктивными. Они обладают высокой чувствительностью, малыми габаритами (емкостные) и инерционностью, простотой устройства. При перемещении мембраны изменяется расстояние между обкладками конденсатора (емкостные датчики) или магнитное сопротивление (индуктивные датчики). Величина емкости датчика — до 100 пФ, частоты питания моста — до нескольких МГц.

Пьезоэлектрический датчик преобразует усилие в электрическое напряжение, в котором используется прямой пьезоэффект, т. е. появление электрических зарядов на гранях кристаллов при их деформировании под действием механических сил. Применяется для измерения параметров вибраций, переменных усилий, давлений и др. В пределах упругих деформаций величина зарядов пропорциональна приложенному усилию. Материалы: кварц, титанат бария и др.

Температурные датчики — в системах управления микроклиматом в жилых помещениях, на фермах, в хра-

нилищах, холодильных установках, на транспортных средствах и др. На практике наибольшее применение получили зондовые контактные и бесконтактные методы и приборы [5, 8]. Для измерения температуры: термометры газовые, жидкостные, с твердым телом (платина, медь). Принцип действия этих приборов основан на физических законах о температурном расширении [33]. Кроме того, широко используются и другие физические свойства: изменение сопротивления в зависимости от температуры (терморезисторы, термисторы); наведение ЭДС между разнородными металлическими проводниками (или полупроводниками), пропорциональной разности температур спаев (термопары). Используемые материалы: медь-константан, молибден-вольфрам, вольфрам-графит, железо-константан и др.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое автоматизированный электропривод? Каковы две основные функции ЭП?
2. Какие устройства определяют: силовой канал электропривода, информационно-управляющий?
3. Назначение преобразовательного устройства (ПУ) в системе ЭП (см. рис. 1.1)
4. По каким признакам классифицируются ЭП?
5. Какие виды обратных связей применяются в автоматизированном ЭП?
6. На какие типы подразделяются системы автоматического регулирования?
7. Чем отличаются САР с общим усилением и с подчиненным регулированием координат?
8. Каковы основные показатели регулирования скорости?

2 МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕХАНИКИ

Назначение электропривода — приводить в движение рабочие машины и управлять им. Величины, характеризующие движение исполнительного органа рабочей машины, приведены в табл. 2.1.

При линейном движении изменение указанных в табл. 2.1 величин происходит под действием сил, а при вращательном — момента M .

Таблица 2.1

Величины, характеризующие движение рабочей машины

Поступательное движение			Вращательное движение		
Величина	Формула для расчета	Единица измерения	Величина	Формула для расчета	Единица измерения
Путь s	$ds = vdt$	м	Угол поворота φ	$d\varphi = \omega dt$	рад
Скорость v	$v = \frac{ds}{dt}$	м/с	Угловая скорость ω	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	рад/с; с ⁻¹
			Частота вращения n	$n = \frac{30\omega}{\pi}$	мин ⁻¹
Ускорение a	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$	м/с ²	Угловое ускорение ε	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$	рад/с ² ; с ⁻²
Динамическая сила F	$F = ma$	Н	Динамический момент M	$M = J \frac{d\omega}{dt}$	Н·м
Масса m	—	кг	Момент инерции J	—	кг·м ²

Для установившихся и динамических режимов действительны следующие соотношения [5, 11].

Работа (энергия) силы F на пути dx за время dt

$$dA = F \cdot dx. \quad (2.1)$$

Развиваемая силой F мощность

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{Fdx}{dt} = Fv. \quad (2.2)$$

Для вращательного движения

$$dA = F \cdot r d\varphi = M \cdot d\varphi; \quad (2.3)$$

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{Md\varphi}{dt} = M\omega, \quad (2.4)$$

где φ — угол поворота; r — радиус; $M = F \cdot r$ — момент; ω — угловая скорость.

При ускорении или замедлении привода возникают избыточные (динамические) момент или сила, которые определяются по второму закону Ньютона

$$F_{\text{дин}} = ma = m \frac{dv}{dt}. \quad (2.5)$$

При этом знак сил («+» или «-») определяется: «+» — ускорение, «-» — замедление.

Энергия, затраченная на преодоление силы $F_{\text{дин}}$ на участке от 0 до x , при достижении скорости v равна запасу кинетической энергии

$$W_{\text{дин}} = W_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}. \quad (2.6)$$

Аналогично при вращательном движении

$$M_{\text{дин}} = J\varepsilon = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (2.7)$$

$$W_{\text{дин}} = W_{\text{кин}} = J \frac{\omega^2}{2}, \quad (2.8)$$

где $J = \int_m r^2 dm$ — момент инерции тела массой m .

В табл. 2.2 приведены расчетные формулы для определения моментов инерции часто встречающихся тел.

Т а б л и ц а 2.2

Моменты инерции вращающихся тел

Тело	Расположение оси вращения	Момент инерции J
Круглое кольцо, тонкое. Полый цилиндр, тонкостенный	Перпендикулярно плоскости кольца	$J = mr^2$
Сплошной цилиндр	Продольная ось	$J = \frac{1}{2}mr^2$
Полый цилиндр, толстостенный	Продольная ось	$J = \frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2)$
Круглый диск	Перпендикулярно плоскости диска	$J = \frac{1}{2}mr^2$
Круглый диск	Ось симметрии в плоскости диска	$J = \frac{1}{4}mr^2$
Шар	Через центр	$J = \frac{2}{5}mr^2$
Сфера	Через центр	$J = \frac{2}{3}mr^2$
Стержень, тонкий (длина l)	Перпендикулярно стержню, в середине	$J = \frac{1}{12}ml^2$

Т а б л и ц а 2.3

Значения КПД механических передач

Тип передачи	КПД
Зубчатая с цилиндрическими колесами	0,93÷0,98
Зубчатая с коническими колесами	0,92÷0,97
Цепная закрытая	0,95÷0,97
Цепная открытая	0,90÷0,93
Фрикционная закрытая	0,90÷0,96
Ременная	0,95÷0,96
Червячная самотормозящая	0,25÷0,4
Червячная несамотормозящая при числе заходов червяка:	
$Z = 1$	0,65÷0,70
$Z = 2$	0,70÷0,75
$Z = 3$	0,80÷0,85
$Z = 4$	0,85÷0,90

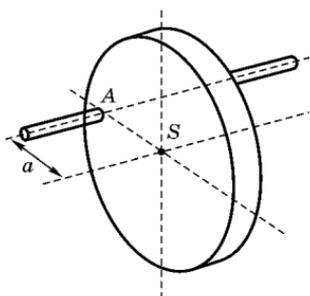


Рис. 2.1
К определению момента инерции

Если ось вращения не проходит через центр тяжести тела (рис. 2.1), то момент инерции относительно оси A определяется по формуле [5]

$$J_A = J_S + a^2 m, \quad (2.9)$$

где J_S — момент инерции относительно оси S ; a — расстояние между параллельными осями.

В табл. 2.3 приведены значения КПД механических передач.

2.2. ПРИВЕДЕНИЕ МОМЕНТОВ И СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ИНЕРЦИОННЫХ МАСС И МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ

Электродвигатель приводит в движение производственный механизм, как правило, через систему передач, отдельные элементы которой имеют свои значения масс (моментов инерции), движутся с различными скоростями (рис. 2.2) [5]. При этом одни элементы могут совершать вращательное движение, другие — поступательное (рис. 2.2*в, г, д*); они часто связаны упругими звеньями — муфтами, канатами, цепями, ремнями, длинными валами, а в соединениях звеньев имеются воздушные зазоры. С учетом указанных факторов расчетная схема механической части привода представляется весьма сложной, особенно для расчета динамики системы.

Для инженерных расчетов в большинстве практических случаев пренебрегают упругостью звеньев, зазорами, представляя механические связи абсолютно жесткими. При этом допущении движение одного элемента дает полную информацию о движении всех остальных звеньев, поэтому сложную расчетную схему механической части привода можно свести к одному обобщенному жесткому звену (одномассовая система) (рис. 2.2*а, 2.3*). В качестве заданного звена принимается обычно вал двигателя. Такая система (рис. 2.3) имеет эквивалентную массу m или

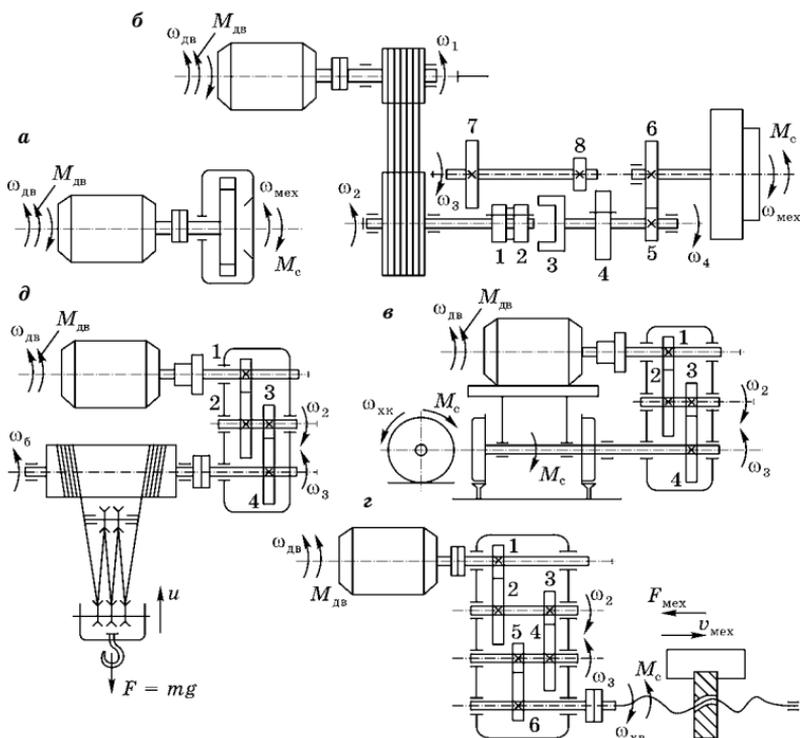


Рис. 2.2

Кинематические схемы электроприводов:

a, б — с вращательным движением исполнительного органа; *в, г, д* — с поступательным движением исполнительного органа.

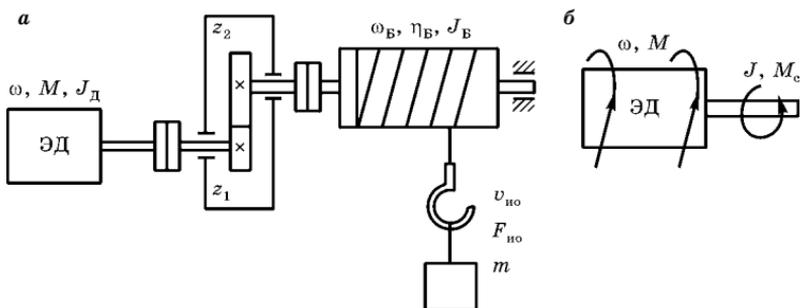


Рис. 2.3

Схема механической части электропривода:

a — реальная; *б* — приведенная расчетная.

момент инерции J , на нее действует электромагнитный момент двигателя $M_{\text{дв}}$ и суммарный приведенный к валу двигателя момент сопротивления M_c , включающий все механические потери, в том числе и в двигателе.

Сами моменты сопротивления подразделяются на две категории:

- 1) реактивные;
- 2) активные или потенциальные.

Реактивные — это моменты от трения, препятствующие движению привода и изменяющие свой знак при смене направления движения.

Активные — это моменты от силы тяжести, сжатия, растяжения и кручения упругих тел. Потенциальными их называют потому, что они связаны с изменением запаса потенциальной энергии отдельных элементов привода. Они сохраняют свой знак при изменении направления, могут быть как тормозными, так и движущими.

Приведение моментов сопротивления к валу двигателя производится на основе энергетического баланса (закон сохранения энергии). При этом потери мощности в промежуточных звеньях учитываются введением в расчеты соответствующих значений КПД (см. табл. 2.2).

На основе баланса мощностей получим

$$M_c \omega_{\text{дв}} = \frac{1}{\eta_{\text{п}}} M_{\text{см}} \omega_{\text{м}}, \quad (2.10)$$

откуда

$$M_c = M_{\text{см}} \frac{\omega_{\text{м}}}{\omega_{\text{дв}}} \frac{1}{\eta_{\text{п}}} = \frac{M_{\text{см}}}{i \eta_{\text{п}}}, \quad (2.11)$$

где $M_{\text{см}}$ — момент сопротивления производственного механизма; M_c — приведенный к валу двигателя момент со-

противления механизма; $i = \frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\text{м}}}$ — общее передаточное отношение передачи; $\eta_{\text{п}}$ — КПД передачи.

Следовательно, величина M_c может быть как больше $M_{\text{дв}}$, так и меньше, в зависимости от значения передаточного отношения (анalogии: рычаг с различными соотношениями плеч; трансформатор понижающий и повышающий).

При наличии нескольких передач между двигателем и механизмом (см. рис. 2.2) с передаточными числами $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ и КПД $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_n$ приведенный момент сопротивления будет

$$M_c = M_{cm} \cdot \frac{1}{i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \dots i_n} \cdot \frac{1}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \dots \eta_n}. \quad (2.12)$$

Если вращательное движение двигателя преобразуется в поступательное движение рабочего органа, то приведение сил сопротивления производится аналогично (см. рис. 2.2в, з, д).

$$M_c \omega_{дв} = F_{cm} v \frac{1}{\eta_{п}}, \quad (2.13)$$

где F_{cm} — сила сопротивления механизма.

Приведенный момент

$$M_c = \frac{F_{cm} v}{\omega_{дв} \eta_{п}}. \quad (2.14)$$

Если вращательное движение приводится к поступательному, то приведенная сила

$$F_{cm} = \frac{M_c \omega_{дв} \eta_{п}}{v}. \quad (2.15)$$

Приведение моментов инерции к одной оси вращения также основано на законе сохранения энергии, а именно: суммарный запас кинетической энергии движущихся частей, отнесенный к одной оси, остается неизменным. При этом

$$J \cdot \frac{\omega_{дв}^2}{2} = J_{дв} \cdot \frac{\omega_{дв}^2}{2} + J_1 \cdot \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \cdot \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \cdot \frac{\omega_n^2}{2}. \quad (2.16)$$

Отсюда суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя

$$J = J_{дв} + J_1 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_{дв}} \right)^2 + J_2 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_{дв}} \right)^2 + \dots + J_n \cdot \left(\frac{\omega_n}{\omega_{дв}} \right)^2, \quad (2.17)$$

где $J_{дв}$ — момент инерции ротора двигателя и других элементов, установленных на валу (например, муфты); $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ — угловые скорости звеньев.

При наличии масс, движущихся поступательно (см. рис. 2.2*в, г, д*), приведение выполняется аналогичным образом

$$\begin{cases} J \frac{\omega_{дв}^2}{2} = \frac{mv^2}{2}, \\ J = m \cdot \left(\frac{v}{\omega_{дв}} \right)^2. \end{cases} \quad (2.18)$$

При наличии вращающихся и поступательно движущихся элементов суммарный приведенный момент определяется на основании (2.17) и (2.18)

$$\begin{aligned} J = J_{дв} + J_1 \cdot \frac{1}{i_1^2} + J_2 \cdot \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \\ + J_3 \cdot \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2} + \dots m \cdot \left(\frac{v}{\omega_{дв}} \right)^2 + \dots, \end{aligned} \quad (2.19)$$

где v — линейная скорость движения; i_1, i_2, \dots, i_3 — передаточные отношения от двигателя к звену.

Таким образом, в результате приведения реальная кинематическая схема заменяется расчетной энергетически эквивалентной одномассовой схемой (см. рис. 2.3*б*).

2.3. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ

Работа электропривода часто сопровождается изменением скорости движения его звеньев, что вызывается рядом причин: колебаниями механической нагрузки, включением и выключением пусковых и тормозных резисторов, изменениями напряжения питания, воздействиями со стороны системы управления и т. д. При этом привод ускоряется или замедляется, появляются инерционные (динамические) силы или моменты, которые двигатель должен преодолевать, находясь в переходном режиме. Таким образом, переходный режим — это режим работы при переходе от одного установившегося состояния к другому, когда изменяются скорость, момент, ток и др. Исследование характера движения рабочего органа производится, как правило, на основе решения уравнения

движения. Уравнение движения электропривода должно учитывать все силы и моменты, действующие в установившихся и переходных режимах.

Согласно уравнению равновесия сил и моментов получим для поступательного и вращательного движения [2, 3, 4, 5]

$$\left. \begin{aligned} F - F_c &= m \frac{dv}{dt} \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

где F_c и M_c , m и J — приведенные сила и момент сопротивления, масса и момент инерции; F , M — сила и момент двигателя; $F_{\text{дин}} = m \frac{dv}{dt}$, $M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}$ — динамические (инерционные) составляющие силы и момента.

Сама электрическая машина в системе привода может работать в двигательном (знак «+») и тормозном (генераторном, знак «-») режимах, поэтому (2.20) в более общем виде запишется

$$\left\{ \begin{aligned} \pm F \mp F_c &= \pm m \frac{dv}{dt} \\ \pm M \mp M_c &= \pm J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right. \quad (2.21)$$

Выбор знаков в (2.21) зависит от режима работы двигателя и характера момента сопротивления. Из анализа (2.20)–(2.21) видно, что при $J = \text{const}$:

1) $M > M_c$, $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon > 0$, имеет место разгон (ускорение) привода, электрическая энергия преобразуется в механическую;

2) $M < M_c$, $\frac{d\omega}{dt} < 0$, имеет место замедление (торможение) привода;

3) $M = M_c$, $\frac{d\omega}{dt} = 0$, привод работает в установившемся режиме.

Динамический момент появляется только во время переходных процессов, когда изменяется скорость привода (аналогия: ЭДС самоиндукции $e = -L \frac{di}{dt}$ будет только

при изменении тока); он определяется алгебраической суммой моментов двигателя и сопротивления, как по величине, так и по знаку.

Интегрирование уравнения (2.20) позволяет определить время переходных процессов при заданных возмущающих воздействиях (изменение M_c , напряжения и др.).

Разделив переменные, получим

$$dt = \frac{Jd\omega}{M - M_c}. \quad (2.22)$$

Время изменения скорости от ω_1 до ω_2

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{Jd\omega}{M - M_c}. \quad (2.23)$$

Для решения этого уравнения необходимо знать механические характеристики двигателя и механизма, т. е. $\omega(M)$ и $\omega(M_c)$. При допущении, что $M = \text{const}$, $M_c = \text{const}$,

$$J = \text{const}$$

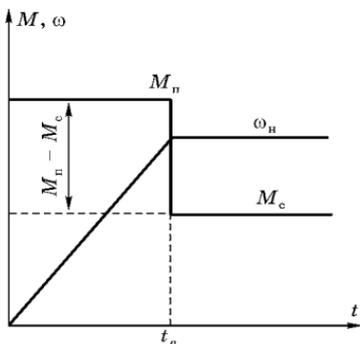


Рис. 2.4

График пуска электропривода

$$t_{1,2} = \frac{J(\omega_2 - \omega_1)}{M - M_c}. \quad (2.24)$$

По этому выражению можно определить время пуска двигателя, приняв $\omega_1 = 0$, $\omega_2 = \omega_n$, $M = M_n = \text{const}$ (рис. 2.4)

Для пуска на холостом ходу $M_c = 0$ ($\omega_2 \approx \omega_0$) при $M_n = \text{const}$.

$$t_n = \frac{J\omega_0}{M_n}. \quad (2.25)$$

При замедлении привода динамический момент имеет отрицательное значение, т. е. $M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$, или же двигатель развивает положительный момент, но по величине меньший момента сопротивления. В этом случае время торможения

$$t_T = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{Jd\omega}{-(M + M_c)} = \int_{\omega_2}^{\omega_1} \frac{Jd\omega}{M + M_c}. \quad (2.26)$$

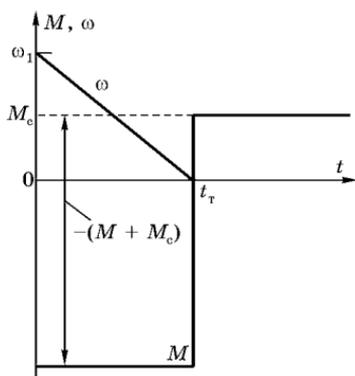


Рис. 2.5
График торможения
электропривода

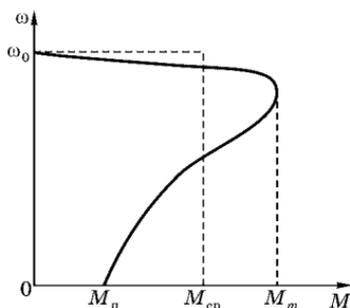


Рис. 2.6
Определение среднего пускового
момента для приближенного
расчета времени пуска

В случае $M = \text{const}$, $M_c = \text{const}$ получим (рис. 2.5)

$$t_T = J \frac{\omega_1 - \omega_2}{M + M_c}. \quad (2.27)$$

Из рис. 2.4–2.5 видно, что при принятых допущениях зависимости $\omega(t)$ являются прямыми, наклон которых зависит от момента $(M - M_c)$ или $(M + M_c)$ и момента инерции.

Если $\omega(M)$ и $\omega(M_c)$ являются сложными функциями, то уравнение движения привода (2.21) аналитически не решается. В таких случаях используются приближенные графические или графоаналитические методы решения [2, 3, 4, 5].

Пример. Оценить время разгона холостую асинхронного двигателя, имеющего характеристику $\omega(M)$, показанную на рис. 2.6. При этом: $\omega_0 = 314$ рад/с, $M_{\text{п}} = 80$ Н·м, максимальный момент $M_m = 120$ Н·м, момент инерции ротора $J_{\text{дв}} = 0,2$ кг·м².

Точное определение времени пуска затруднено из-за нелинейной характеристики $\omega(M)$. Если момент за время пуска усреднить, т. е. реальную характеристику заменить прямоугольной, когда $M_{\text{п}} = M_{\text{ср}} = \text{const}$, то получим из (2.24, 2.25)

$$t_{\text{п}} = \frac{J \omega_0}{M_{\text{п}}} = \frac{J_{\text{дв}} \omega_0}{M_{\text{ср}}} = \frac{0,2 \cdot 314}{100} = 0,63 \text{ с},$$

где

$$M_{\text{ср}} = \frac{M_m + M_{\text{п}}}{2} = \frac{120 + 80}{2} = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Очевидно, что минимум времени разгона наблюдается при наибольшем ускорении. Пусть $M_{\text{с}} = \text{const}$, а КПД механической передачи (редуктора) равен единице, тогда (2.20) может быть записано в виде

$$M i_{\text{п}} - M_{\text{ио}} = (J_{\text{дв}} i_{\text{п}}^2 + J_{\text{ио}}) \frac{d\omega_{\text{ио}}}{dt}, \quad (2.28)$$

где $M_{\text{ио}}$ — момент нагрузки исполнительного органа.

Отсюда ускорение исполнительного органа

$$\varepsilon_{\text{ио}} = \frac{d\omega_{\text{ио}}}{dt} = \frac{M \cdot i_{\text{п}} - M_{\text{ио}}}{J_{\text{дв}} i_{\text{п}}^2}. \quad (2.29)$$

Максимум ускорения будет при $\frac{d\varepsilon}{di_{\text{п}}} = 0$. В итоге получим оптимальное значение передаточного отношения

$$i_{\text{п опт}} = \frac{M_{\text{ио}}}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{ио}}}{M}\right)^2 + \frac{J_{\text{ио}}}{J_{\text{дв}}}}. \quad (2.30)$$

Отметим, что величина приведенного момента инерции J механизма учитывает и моменты инерции передач — зубчатых колес, валов, промежуточных муфт. Кроме того, (2.30) дает оптимальное передаточное отношение только по максимуму ускорения без учета других факторов.

Если $M_{\text{с}} \ll M$, то (2.30) запишется в виде

$$i_{\text{п опт}} \approx \sqrt{\frac{J_{\text{ио}}}{J_{\text{дв}}}}. \quad (2.31)$$

Из (2.31) очевидно, что чем больше момент инерции производственного механизма $J_{\text{ио}}$ по сравнению с $J_{\text{дв}}$, тем выше должно быть передаточное число $i_{\text{п}}$ редуктора. Вопрос выбора такого числа особенно важен в приводах, работающих в повторно-кратковременных режимах S3.

2.4. ПРИВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

В производстве используется множество машин и механизмов различных типов и назначения, отличающихся видом и параметрами движения рабочего органа, мощностью двигателя, условиями и режимами работы,

видом приводных характеристик: технологических, энергетических, пусковых, инерционных, нагрузочных, механических. Разнообразии машин определяет широкий спектр применяемых электроприводов, которые должны отвечать предъявляемым к рабочим машинам требованиям по указанным выше характеристикам.

Технологические характеристики определяют требования к электроприводу по соблюдению технологического процесса: качеству, режимам, безопасной работе в помещениях различного типа.

Энергетические характеристики показывают расход электроэнергии (общий и удельный) на выполнение технологического процесса. Очевидно, что при разработке или выборе электроприводов приоритет отдается энерго- и ресурсосберегающим системам. Учитывая, что электроприводы потребляют до 70% всей вырабатываемой электроэнергии, именно здесь содержится основной потенциал по энергосбережению.

Пусковые характеристики определяют значения пусковых моментов, токов, длительность пуска, которые, в свою очередь, во многом зависят от типа машин, нагрузочных диаграмм и инерционных характеристик.

Инерционные характеристики показывают значение и характер изменения момента инерции машины. У большинства машин с вращательным движением рабочего органа момент инерции — величина постоянная. У поршневых насосов и компрессоров, лесопильных рам момент инерции зависит от угла поворота. Влияние величины приведенного момента инерции машины на переходные процессы характеризуется его отношением к моменту инерции ротора двигателя. Например, в грузоподъемных механизмах это отношение мало из-за наличия понижающего редуктора, поэтому процессы пуска в них не являются тяжелыми.

В центрифугах при частотах вращения до 10 000 об/мин приведенный момент инерции барабана в сотни и тысячи раз больше момента инерции ротора. Поэтому здесь пуск затяжной, и, как следствие, повышенный нагрев обмоток двигателя, поэтому необходимо использовать специальные системы приводов.

Нагрузочные характеристики — это зависимости момента сопротивления M_c , мощности P_c и угловой скорости ω от времени. Они определяют режим работы электропривода.

Механические характеристики — это зависимости установившейся скорости от сил сопротивления или момента $\nu(F_c)$, $\omega(M_c)$, приведенных (обычно) к валу двигателя. Различные механизмы имеют разные механические характеристики, однако большинство из них с достаточной точностью описывается эмпирической формулой

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (2.32)$$

где M_0 — момент холостого хода механизма; M_c — момент сопротивления при скорости ω ; $M_{сн}$ — номинальный момент сопротивления при $\omega = \omega_n$; x — показатель степени, определяющий тип характеристик:

1. $x = 0$, $M = \text{const}$ (рис. 2.7, прямые 1, 2). Такой характеристикой обладают подъемные механизмы, насосы при постоянстве давления, конвейеры и др.

2. $x = 1$ — линейно-возрастающая характеристика (рис. 2.7, кривая 3), которой обладает генератор постоянного тока независимого возбуждения при работе на сопротивление $R = \text{const}$ при $i_b = \text{const}$.

3. $x = -1$ — нелинейно-спадающая характеристика (рис. 2.7, кривая 4). При этом мощность $P = M\omega = \text{const}$ (гиперболическая зависимость $\omega(M)$).

4. $x = 2$ — нелинейно-возрастающая (параболическая) характеристика (рис. 2.7, кривая 5), когда момент сопротивления пропорционален квадрату скорости, $M \equiv \omega^2$, а мощность $P = M\omega \equiv \omega^3$. Такой характеристикой обладает большинство турбомеханизмов: турбокомпрессоры, насосы, вентиляторы при $Q \equiv \omega$, напоре $H \equiv \omega^2$ [5, 10, 52].

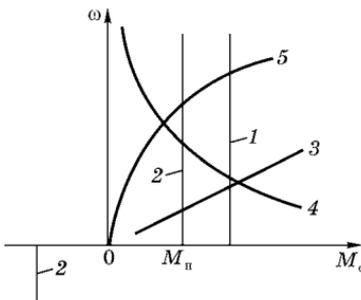


Рис. 2.7

Механические характеристики производственных механизмов (исполнительных органов)

2.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА ДВИГАТЕЛЯ И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО МЕХАНИЗМА

Механическая характеристика вращающегося электродвигателя — это зависимость угловой скорости от вращающего (электромагнитного) момента, т. е. $\omega(M)$; для машин поступательного движения (линейные двигатели) — зависимость скорости от развиваемого усилия $v(F)$. Большинство электродвигателей обладают спадающей механической характеристикой, когда с увеличением момента скорость убывает (рис. 2.8).

Различаются естественная и искусственная механические характеристики. Естественной называется характеристика, соответствующая основной схеме включения при $U = U_n$ и с отсутствием в обмотках (электрических цепях) дополнительных элементов — сопротивлений, индуктивностей, емкостей. На рис. 2.8 изображены характеристики: 4 — синхронного двигателя, когда $\omega = \text{const}$ при $M = \text{var}$; 1 — двигателя постоянного тока независимого возбуждения; 2 — двигателя постоянного тока последовательного возбуждения; 3 — асинхронного двигателя; 5 — $M = \text{const}$ с изменением скорости. Такой характеристикой (5) обладают двигатели постоянного тока независимого возбуждения при питании от источника тока, т. е. $I_a = \text{const}$.

Искусственные механические характеристики получают при $U \neq U_n$, $f \neq f_n$, $i_b \neq i_{bn}$ или введением в цепь обмоток дополнительных элементов. Таких характеристик может быть много. Следует особо отметить, что КПД двигателей, работающих на естественной характеристике, имеет значения $\eta = (0,8 \div 0,98)$, а на искусственных — в зависимости от способа регулирования — КПД привода может быть значительно меньше. Эти дополнительные потери связаны, как правило, с регулированием.

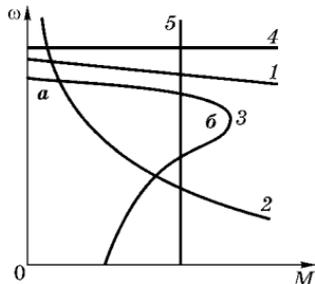


Рис. 2.8
Естественные механические характеристики электродвигателей

Для всей системы привода КПД во многом зависит и от типа механического передающего устройства (МПУ) (см. рис. 1.1) и в некоторых случаях может быть значительно ниже КПД двигателя. Например, использование одноступенчатого червячного редуктора для получения низких скоростей снижает КПД привода до $\approx 0,5$ и ниже.

Жесткость механической характеристики электропривода — это отношение изменения момента к изменению скорости

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \approx \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (2.33)$$

Отсюда следует, что характеристика синхронного двигателя (рис. 2.8, прямая 4) является абсолютно жесткой ($\Delta \omega = 0$, $\beta = \infty$); двигателя постоянного тока независимого возбуждения (прямая 1) — жесткой, а с последовательным возбуждением (кривая 2) — мягкой; характеристика асинхронного двигателя (кривая 3) имеет переменную жесткость, на рабочем участке — жесткую; характеристика типа 5 — абсолютно мягкая, $\Delta M = 0$, $\beta = 0$.

Таким же образом можно определить и механические характеристики производственных механизмов (см. рис. 2.7): прямые 1, 2 — абсолютно мягкие; 3, 5 — имеют положительную жесткость; 4 — мягкая, с отрицательной жесткостью.

Совмещение характеристик двигателя и производственного механизма (рис. 2.9) дает представление об условиях выполнимости установившегося режима, когда

$M = M_c$, $\frac{d\omega}{dt} = 0$. На рис. 2.9 представлены механические

характеристики вентилятора (кривая 1) и двигателя постоянного тока независимого возбуждения (кривая 2). Точка А является точкой устойчивого установившегося режима, здесь $M = M_c$. Устойчивым будет режим, когда привод, будучи выведенным из установившегося режима внешним возмущением, возвращается в эту точку после исчезновения возмущения. Если внешнее воздействие привело к росту скорости до ω' , то момент двигателя снижается до M' . Появился отрицательный динамический момент

$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} = M' - M < 0$ — привод тормозится до скорости

$\omega_{уст}$ (точка А). Если возмущение вызовет снижение скорости до ω'' , момент двигателя возрастет до M'' , динамический момент $M_{дин} > 0$, скорость увеличится до $\omega_{уст}$ (точка А). Таким образом, режим работы в точке А является устойчивым.

Из сказанного выше следует, что необходимым и достаточным условием устойчивости установившегося режима является

$$\frac{M_{дин}}{\Delta\omega} < 0. \quad (2.34)$$

Можно воспользоваться понятием жесткости характеристик двигателя и приводного механизма, тогда условие устойчивой работы

$$\beta - \beta_c < 0 \text{ или } \beta < \beta_c. \quad (2.35)$$

Для рассмотренного случая $\beta_c > 0$ (рис. 2.9), поэтому устойчивость определяется знаком жесткости характеристики двигателя.

Пример. Грузоподъемная лебедка, имеющая кинематическую схему, показанную на рис. 2.3, поднимает груз массой $m_{гр} = 1000$ кг. Максимальная скорость подъема груза $v_{max} = 1,0$ м/с. Ускорение и замедление при достижении максимальной скорости и снижении ее до нуля $a = 0,23$ м/с². Момент инерции барабана $J_{бар} = 80$ кг·м². Момент инерции ротора двигателя $J_{рот} = 1,5$ кг·м². Момент инерции ведущей и ведомой шестерен редуктора соответственно $J_{зк1} = 0,1$ кг·м² и $J_{зк2} = 5,0$ кг·м². Максимальная (номинальная) частота вращения двигателя $n_{max} = 600$ мин⁻¹. КПД редуктора $\eta_{ред} = 0,9$. Высота подъема груза $H = 24$ м. Радиус барабана $R_{бар} = 0,25$ м.

Задача: построить диаграмму изменения скорости и момента на валу электродвигателя за время подъема груза.

Решение:

1. Время ускорения (t_1) и замедления (t_3) груза, при равноускоренном движении

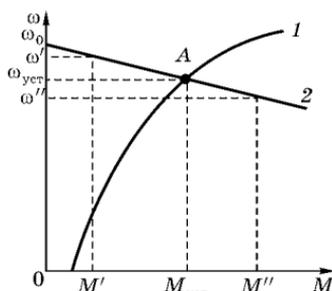


Рис. 2.9
Определение параметров установившегося режима

$$t_1 = t_3 = \frac{v_{\max}}{a} = \frac{1,0}{0,25} = 4 \text{ с.}$$

2. Пути, проходимые грузом за время t_1 и t_3 ,

$$S_1 = S_3 = \frac{at^2}{2} = \frac{0,25 \cdot 4^2}{2} = 2 \text{ м.}$$

3. Время движения с максимальной скоростью

$$t_2 = \frac{H - (S_1 + S_3)}{v_{\max}} = \frac{24 - (2 + 2)}{1} = 20 \text{ с.}$$

4. Максимальная угловая скорость двигателя

$$\omega_{\max} = \frac{\pi n_{\max}}{30} = \frac{3,14 \cdot 600}{30} = 62,8 \text{ с}^{-1}.$$

5. Максимальная скорость барабана

$$\omega_{\text{бар max}} = \frac{v_{\max}}{R_{\text{бар}}} = \frac{1}{0,25} = 4 \text{ с}^{-1}.$$

6. Передаточное отношение редуктора

$$i_{\text{ред}} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\text{бар max}}} = \frac{62,8}{4} = 15,7.$$

7. Статический момент на валу барабана

$$M_{\text{с бар}} = m_{\text{гр}} g R_{\text{бар}} = 1000 \cdot 9,8 \cdot 0,25 = 2452 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

8. Статический момент, приведенный к валу двигателя,

$$M_{\text{с}} = \frac{M_{\text{с бар}}}{i \eta_{\text{ред}}} = \frac{2452}{15,7 \cdot 0,9} = 174 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

9. Суммарный момент инерции механической системы, приведенный к валу двигателя,

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} &= J_{\text{рот}} + J_{\text{ЗК1}} + \frac{J_{\text{ЗК2}} + J_{\text{бар}} + m_{\text{гр}} R_{\text{бар}}^2}{i^2} = \\ &= 1,5 + 0,1 + \frac{5 + 80 + 1000 \cdot 0,25^2}{15,7^2} = 2,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \end{aligned}$$

10. Момент на валу двигателя в период разгона t_1

$$M = M_{\text{с}} + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 174 + 2,2 \frac{62,8}{4} = 211 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

11. Момент на валу двигателя в период движения с установившейся максимальной скоростью

$$M = M_c = 174 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

12. Момент на валу двигателя в период торможения t_3

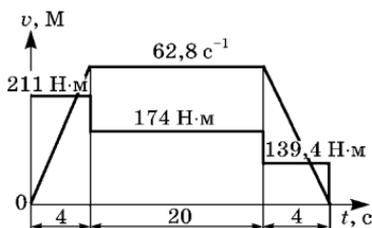


Рис. 2.10
 Диаграмма скорости
 и момента на валу двигателя

$$M = M_c - J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = 174 - 2,2 \frac{62,8}{4} = 139,4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Диаграммы скорости и момента приведены на рис. 2.10.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую зависимость отражают механические характеристики двигателя и рабочей машины?
2. Что такое жесткость механических характеристик?
3. Какую жесткость имеют механические характеристики синхронного и асинхронного двигателей?
4. Что такое динамический момент двигателя?
5. Что отражает момент инерции тела вращения?
6. У каких рабочих машин $M \equiv \omega^2$, $P \equiv \omega^3$?
7. В чем состоит цель приведения моментов и сил к валу двигателя?
8. Какой закон физики лежит в основе приведения моментов, сил, масс и моментов инерции?

3 ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Двигатели постоянного тока долгое время применялись практически во всех регулируемых приводах. Однако, начиная с 60-х гг. XX в., в связи с созданием полупроводниковых вентилей-тиристоров, а с 1980-х гг. и полностью управляемых силовых транзисторов, на ведущие позиции выходит электропривод переменного тока с асинхронными и вентильными двигателями.

В нашей стране приводы с двигателями постоянного тока занимают доминирующее положение в определенных областях экономики [22, 32].

Прежде всего, это тяговый привод для электрифицированного транспорта, начиная от электропоездов, работающих от аккумуляторной батареи, и заканчивая магистральными электровозами, питающимися от контактной сети постоянного тока напряжением 3000 В или однофазной переменного тока 25 000 В. В последнем случае двигатели запитываются через понижающий трансформатор и выпрямитель.

Промышленность выпускает тяговые двигатели для привода: трамваев мощностью 50 кВт при напряжении 275 В; вагонов метрополитена мощностью 110 кВт при напряжении 375 В; пригородных электропоездов мощностью 250 кВт при напряжении 750 и 1500 В; магистральных электровозов мощностью до 1000 кВт при постоянном напряжении 1500 В и выпрямленном 800 В. В тепловозах, большегрузных самосвалах, на судах, где используется электропередача по схеме: первичный двигатель (дизель,

газовая или паровая турбины) → синхронный генератор → выпрямитель → тяговый двигатель, также применяются двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением. При этом мощности: для тепловозов до 400 кВт на ось; самосвалов — до 600 кВт на колесо (двигатели типа мотор-колесо с планетарным редуктором); гребные двигатели для судов до нескольких тысяч киловатт при низких частотах вращения. Например, для атомного ледокола «Ленин» был создан двигатель мощностью 19 600 кВт в двухъякорном исполнении.

Для привода прокатных станков, где большие (до четырехкратных) кратковременные перегрузки по току, частые реверсы, также используются одноякорные двигатели постоянного тока мощностью до 14 000 кВт и двухъякорные мощностью 25 000 кВт при частоте вращения до 100 об/мин.

Двигатели серии 4П мощностью от 132 до 1000 кВт применяются в приводах, где требуется регулирование частоты вращения в широких пределах. Напряжение — от 440 до 930 В, частота вращения — от 350 до 2000 об/мин; возбуждение — независимое, вентиляция — принудительная.

Можно также отметить двигатели типов 4ПП, 4ПС, 4ПМ для буровых установок мощностью от 750 до 1000 кВт, напряжением 800 В при частотах вращения 1000÷1500 об/мин.

Для шагающих экскаваторов выпускаются двигатели для привода механизмов поворота, тяги и шагания типов МПЭ, ГПЭ мощностью от 90 до 1250 кВт.

Машины меньшей мощности серии 4П, 2ПФ общепромышленного назначения допускают регулирование скорости в диапазоне до 5:1, большие кратковременные перегрузки по току при максимальной частоте вращения до 4000 об/мин.

В сельском хозяйстве двигатели постоянного тока до сих пор применяются в качестве приводных в электропозвонках, электрокарах, кормораздатчиках, работающих на аккумуляторных батареях.

Кроме перечисленных областей применения приводов постоянного тока существуют и другие, о чем подробно в [5, 6, 12, 37].

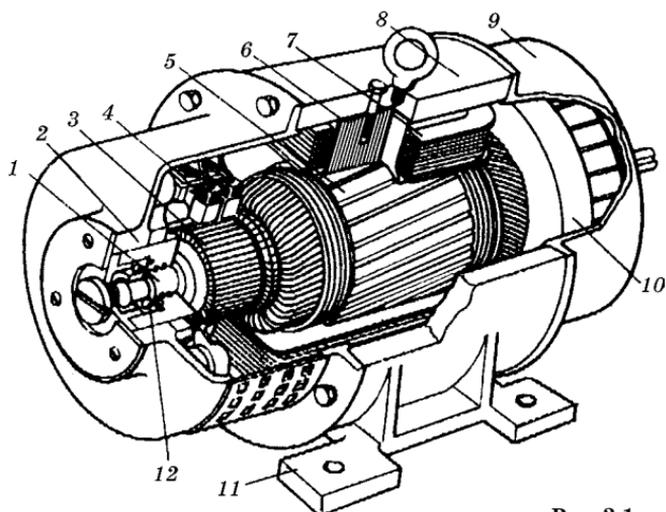


Рис. 3.1
Устройство машины
постоянного тока:

1 — вал; 2, 9 — щиты подшипников; 3 — коллектор; 4 — щетка; 5 — якорь с обмоткой; 6 — сердечник главного полюса; 7 — катушка возбуждения; 8 — станина; 10 — вентилятор; 11 — лапа станины; 12 — подшипник.

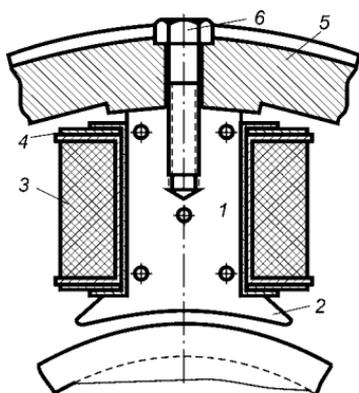


Рис. 3.2
Главный полюс с обмоткой
возбуждения:

1 — сердечник полюса; 2 — наконечник (башмак); 3 — катушка; 4 — каркас крепления катушки; 5 — станина; 6 — винт крепления полюса.

Если сравнивать машины постоянного тока с машинами переменного тока, то у первых обычно отмечаются высокие перегрузочная способность и регулировочные свойства. В то же время они более дорогие — примерно в два раза дороже асинхронных такой же мощности, у них выше материалоемкость, габариты, эксплуатационные расходы, ниже надежность, в основном из-за узла «щет-ки — коллектор».

На рис. 3.1–3.3 представлены общее устройство машины постоянного тока и основные элементы конструкции.

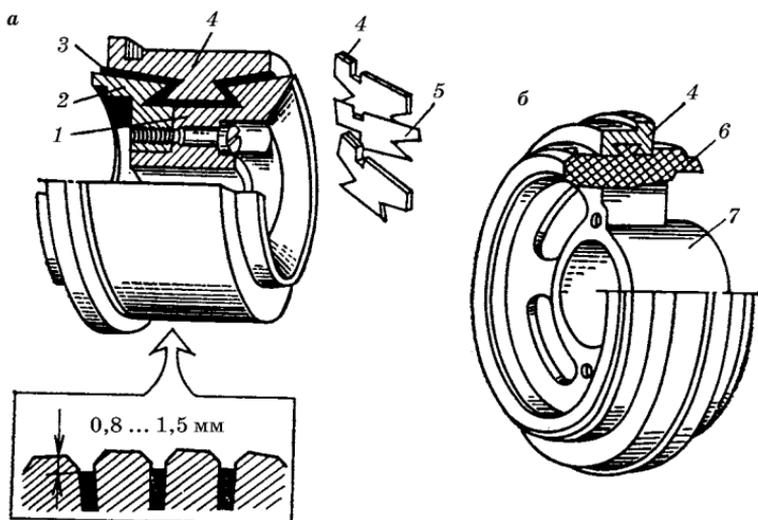


Рис. 3.3

Коллекторы машин постоянного тока с металлическими нажимными шайбами (а) и на пластмассе (б):

1 — корпус; 2 — наконечник (башмак); 3 — изоляционная манжета; 4 — коллекторные пластины; 5 — изоляционные прокладки; 6 — пластмасса; 7 — втулка.

Обмотка возбуждения создает основной магнитный поток в зазоре Φ_{δ} , в процессе преобразования энергии она не участвует. Основной является якорная обмотка, именно она обменивается энергией с сетью. При этом узел «щетки — коллектор» выполняет функции выпрямителя в режиме генератора и инвертора — в режиме двигателя (в самой обмотке якоря ток переменный, только при этом возможно непрерывное преобразование энергии). Источником электрической энергии является обмотка якоря генератора, а обмотка двигателя — ее потребителем.

3.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

В электроприводах постоянного тока применяются электродвигатели независимого (параллельного), последовательного и, в меньшей степени, смешанного возбуждений. Схемы включения их показаны на рис. 3.4, при этом добавочное сопротивление в цепи обмотки якоря $R_{ад}$

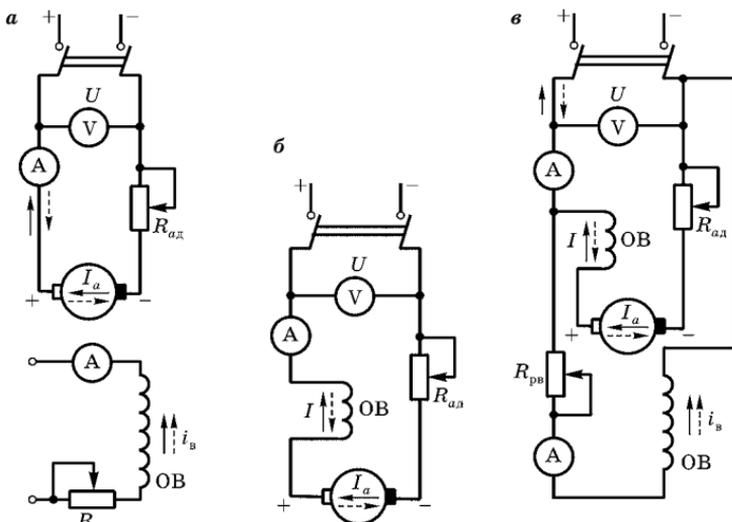


Рис. 3.4

Схемы включения двигателей:

a — независимого возбуждения; *б* — последовательного возбуждения; *в* — смешанного возбуждения; сплошные стрелки — направления токов в генераторном режиме; штриховые — в двигательном.

показано регулируемым, т. е. $0 \leq R_{ад} \leq R_{ад\max}$. Если $R_{ад} = 0$, $U = U_H$, $i = i_{вн}$, то характеристики называются естественными, а при $R_{ад} \neq 0$ или $U \neq U_H$, $i_B \neq i_{вн}$ — искусственными. В режиме двигателя электрическая энергия потребляется из сети, преобразуется в механическую, мощность которой $P = \omega M$. Зависимость между моментом M и скоростью ω есть механическая характеристика двигателя.

Основные соотношения для двигателей постоянно го тока.

Уравнение напряжений для цепи якоря по второму закону Кирхгофа:

$$U_a = E_a + I_a(R_a + R_{ад}). \quad (3.1)$$

ЭДС обмотки якоря и момент:

$$E_a = C\Phi\omega, \quad M = C\Phi I_a. \quad (3.2)$$

Уравнение электромеханической характеристики:

$$\omega(I_a) = \frac{U}{C\Phi} - \frac{I_a(R_a + R_{ад})}{C\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (3.3)$$

Уравнение механической характеристики:

$$\omega(I_a) = \frac{U}{C\Phi} - \frac{M(R_a + R_{ад})}{(C\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (3.4)$$

Обозначения в формулах (3.1–3.4): R_a — сопротивление самой обмотки якоря относительно внешних зажимов; $R_{ад}$ — добавочное сопротивление в цепи якоря; I_a — ток обмотки якоря (рис. 3.4); $C = \frac{N}{2\pi a}$ — постоянная для конкретной машины; p — число пар полюсов; N — число эффективных проводников обмотки якоря; ω — угловая скорость; Φ — магнитный поток в зазоре, $\Phi = \alpha_\delta B_\delta \tau$; — коэффициент полюсной дуги, $\alpha_\delta = 0,6 \div 0,75$; τ — полюсное деление, $\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$; D_a, l_a — диаметр и длина якоря соответственно; B_δ — индукция в зазоре, $B_\delta = (0,7 \div 1,0) \text{Тл}$; ω_0 — скорость идеального холостого хода, $\omega_0 = \frac{U}{C\Phi}$; $\Delta\omega$ — снижение скорости под влиянием нагрузки.

Из (3.3, 3.4) видно, что для двигателя *независимого возбуждения* при неизменных U, Φ — характеристики представляются прямыми линиями, а их жесткость зависит от сопротивления якорной цепи ($R_a + R_{ад}$) и потока Φ . Следовательно, изменяя указанные параметры (U, Φ, R_a), можно регулировать скорость электропривода.

На рис. 3.5 представлены механические характеристики двигателя независимого возбуждения в различных режимах работы при $R_{ад} = \text{var}$ ($R_{ад1}, R_{ад2}, R_{ад3}$). При $R_1 = R_a$ ($R_{ад} = 0$) характеристика называется естественной,

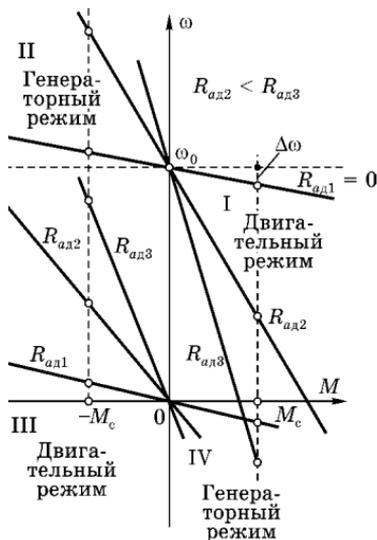


Рис. 3.5
Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в различных режимах

а остальные — искусственные ($R_{ад} \neq 0$). Естественная характеристика является жесткой, относительный статический перепад скорости $\Delta\omega = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = 0,02 \div 0,05$. При

$U = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$, все характеристики выходят из одной точки на оси ординат — скорости идеального холостого хода, когда $I_a = 0$, $U = E$. Из графика следуют и режимы работы (рис. 3.6).

I квадрант. Двигательный режим, электрическая энергия потребляется из сети и преобразуется в механическую,

$M > 0$, $U_a > E_a$, $I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a + R_{ад}}$ (рис. 3.6б).

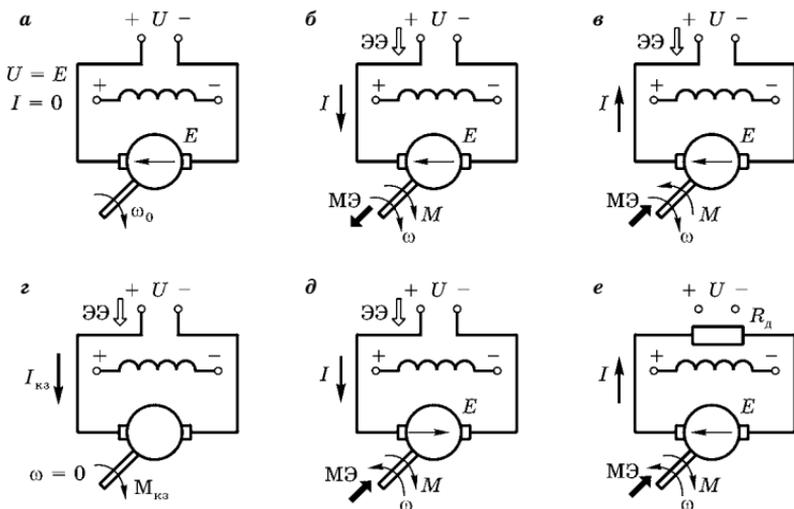


Рис. 3.6

Энергетические режимы ДПТ независимого возбуждения:

а — холостой ход; б — двигательный; в — генераторный параллельно с сетью; г — короткое замыкание; д — генераторный последовательно с сетью; е — генераторный независимо от сети.

II квадрант. Генераторный режим, энергия (механическая) поступает с вала и преобразуется в электрическую. При этом она может отдаваться в сеть (рекуперация) при $\omega > \omega_0$ или рассеиваться в реостатах (динамическое или реостатное торможение) (рис. 3.6в, е). В режиме рекупе-

рации $M < 0$, $U_a < E_a$, $I_a = \frac{E_a - U_a}{R_a + R_{ад}}$. При динамическом торможении $U_a = 0$, ток, $M < 0$. Практически якорь отключается от сети и замыкается на сопротивление R (рис. 3.6е).

III квадрант. Режим двигателя, обратное вращение, $M < 0$, $\omega < 0$, $P = M$, $\omega > 0$, $I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a + R_{ад}}$.

IV квадрант. Режим генератора или противовключения, энергия поступает как из сети (электрическая), так и с вала (механическая) и полностью рассеивается в сопротивлении якорной цепи. Ток необходимо ограничивать выбором сопротивления $R_{ад}$ (рис. 3.6д).

В генераторном режиме электромагнитный момент имеет тормозной характер, поэтому такой режим используется для торможения транспортных средств, лифтов, при опускании груза и т. д. Для получения режима противовключения обычно переключается полярность напряжения, подводимого к якорю. В некоторых случаях требуется постоянство замедления, например в пассажирском транспорте. Для этого применяются все три вида торможения: при высокой скорости обеспечивается условие $E_a > U_a$ (рекуперация), а величину момента (тока) можно регулировать изменением потока; затем переходят на реостатное торможение, регулируя момент изменением величины сопротивления R_d при уменьшающейся ЭДС E_a (рис. 3.6е); при низкой скорости используется противовключение, вплоть до остановки при замкнутой на сопротивление обмотке якоря.

На практике чаще применяются динамическое торможение и противовключение. С точки зрения экономичности самым рациональным является рекуперация, однако этот режим не всегда осуществим (по скорости) и по возможности использования отдаваемой энергии.

Характеристики двигателей последовательного возбуждения также описываются уравнениями (3.1–3.4). Основной особенностью этих машин является зависимость магнитного потока от тока нагрузки I_a (см. рис. 3.4б), следовательно, исключается понятие скорости идеального

холостого хода ω_0 . Более того, при малых нагрузках ($I_a < 0,2I_{aн}$) скорость двигателя резко увеличивается из-за снижения магнитного потока. По этой причине двигатели последовательного возбуждения нельзя запускать на холостом ходу.

Если допустить, что магнитная система машины не насыщена, то при $I_e = I_a$ поток $\Phi = kI_a$, момент $M = C\Phi I = CkI_a^2$, уравнения электромеханической и механической характеристик будут

$$\omega(I_a) = \frac{U}{CkI_a} - \frac{R_a + R_{ад}}{Ck}. \quad (3.5)$$

$$\omega(M) = \frac{U}{\sqrt{CkM}} - \frac{R}{Ck}. \quad (3.6)$$

В подтверждение сказанного выше отметим:

1. При $I_a \rightarrow 0$, $M \rightarrow 0$, $\omega \rightarrow \infty$, т. е. ось ординат ω является асимптотой для характеристики (3.5, 3.6).

2. При $I_a \rightarrow \infty$, $M \rightarrow \infty$, $\omega = -\frac{R}{Ck}$, т. е. горизонтальная прямая с ординатой также является асимптотой (горизонтальной).

В этом случае зависимости $\omega(I_a)$ и $\omega(M)$ имеют гиперболический вид. Отсюда следует, что машина не имеет генераторного режима работы параллельно с сетью.

Режим торможения противовключением возможен и осуществляется так же, как и у двигателя с независимым возбуждением.

Динамическое (реостатное) торможение такого двигателя чаще реализуется по схеме с независимым возбуждением (см. рис. 3.6).

Реально магнитная система насыщена, характеристика не имеет гиперболической зависимости (рис. 3.7), но ее называют мягкой, с переменной жесткостью. Тем не менее при общей для двигателей постоянного тока перегрузочной способности по току $k_I = \frac{I_{\max}}{I_H} = (2 \div 3)$ по условиям коммутации двигатели последовательного возбуждения имеют существенно большую перегрузочную способность по моменту. Именно это свойство используется в тяговом

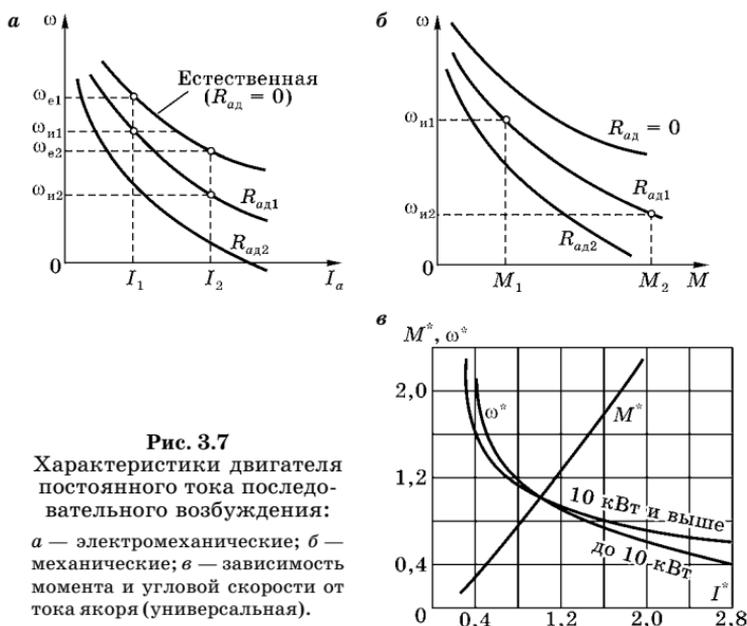


Рис. 3.7

Характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения:

a — электромеханические; *б* — механические; *в* — зависимость момента и угловой скорости от тока якоря (универсальная).

приводе, а также при резко изменяющемся моменте сопротивления.

Двигатель смешанного возбуждения (см. рис. 3.6в) имеет две обмотки возбуждения — независимую и последовательную, поэтому его механические характеристики занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей независимого и последовательного возбуждения. Здесь скорость идеального холостого хода определяется магнитным потоком независимой (шунтовой) обмотки возбуждения, $\omega = \frac{U}{C\Phi_{ш}}$.

Соотношения НС обмоток возбуждения определяются требованиями по регулировочным характеристикам, перегрузочной способности по моменту и др. Характеристики двигателя (см. рис. 3.8) имеют переменную жесткость.

Пример. Рассчитать естественные электромеханическую $\omega(I_a)$ и механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения по паспортным данным; $P_H = 2,2$ кВт; $U_H = 220$ В; $I_{aH} = 13$ А; $n_H = 1000$ об/мин; $\eta_H = 0,77$; $i_{aH} = 0,73$ А; $R_{об} = 300$ Ом.

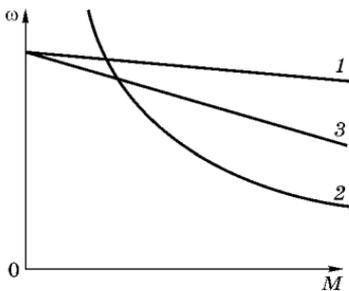


Рис. 3.8
Естественные механические характеристики двигателей:
1 — независимого возбуждения; 2 — последовательного возбуждения; 3 — смешанного возбуждения.

Для построения характеристик необходимо рассчитать координаты двух точек: номинального режима и идеального холостого хода.

1. Для точки номинального режима:

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 1000}{60} = 105 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{2200}{105} = 21 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Номинальный ток якоря $I_{ан} = 13 \text{ А}$.

Номинальное сопротивление двигателя:

$$R_n = \frac{U_n}{I_{ан}} = \frac{220}{13} = 17 \text{ Ом.}$$

2. Для режима идеального холостого хода:

Сопротивление якорной цепи, по приближенной формуле:

$$R_a \approx 0,5 \cdot \frac{U_n}{I_{ан}} (1 - \eta) = 0,5 R_n (1 - \eta_n) = 0,5 \cdot 17 \cdot (1 - 0,77) = 2 \text{ Ом.}$$

$$R_a^* = \frac{R_a}{R_n} = \frac{2}{17} = 0,116.$$

$$C\Phi = \frac{U_n - I_n R_a}{\omega_n} = \frac{E_{ан}}{\omega_n} = \frac{220 - 13 \cdot 2}{105} = 1,84 \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}}.$$

Скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_n}{C\Phi} = \frac{220}{1,84} = 120 \text{ рад/с; } \Delta\omega_n = 120 - 105 = 15 \text{ рад/с.}$$

Найденные значения ω_0 , I_a , M_n , ω_n позволяют построить искомые характеристики.

3.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ, ТОКА И МОМЕНТА

3.3.1. РЕГУЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ РЕЗИСТОРОВ В ЦЕПИ ЯКОРЯ

Этот способ, называемый *реостатным*, является самым простым по реализации, поэтому применяется для регулирования скорости, тока и момента, но по отношению к току и моменту более правильно говорить об их ограничении.

Варьируя сопротивление добавочного резистора $R_{ад}$ в цепи якоря (см. рис. 3.4), можно получить семейство искусственных характеристик (см. рис. 3.5, 3.7). При этом величина ω_0 не зависит от сопротивления $R_{ад}$ при независимом возбуждении

$$\omega_0 = \text{const} = \frac{U}{C\Phi}, \quad (3.7)$$

а при последовательном — ось ω является асимптотой для всех характеристик. Наклон характеристик, определяемый перепадом скорости

$$\Delta\omega = \frac{I_a(R_a + R_{ад})}{C\Phi} = \frac{M(R_a + R_{ад})}{(C\Phi)^2}, \quad (3.8)$$

при конкретных значениях тока I_a и момента M , пропорционален сопротивлению цепи якоря ($R = R_a + R_{ад}$), поэтому с увеличением $R_{ад}$ характеристики становятся более мягкими, $\Delta\omega$ увеличивается. По выражению для $\Delta\omega$ строятся реостатные характеристики двигателя независимого возбуждения по известным ω_0 , ω_n , $\Delta\omega_n$, M (см. рис. 3.5). Момент короткого замыкания (точка пересечения с осью абсцисс)

$$M_{кз} = C\Phi I_{акз}, \quad (3.9)$$

где $I_{акз} = \frac{U}{R_a + R_{ад}}$ — ток короткого замыкания, $I_{акз} \leq (2 \div 3) I_{ан}$.

Основные показатели реостатного способа регулирования:

1. Диапазон регулирования $D \leq (2 \div 3)$. Причина низкого значения D заключается в снижении жесткости, значительных потерях и низкой стабильности скорости.

2. Направление регулирования — вниз от естественной (однозонное).

3. Плавность регулирования определяется плавностью регулирования $R_{ад}$. Обычно это делают ступенями, однако с ростом числа ступеней возрастает количество аппаратуры и усложняется управление.

4. Экономичность регулирования оценивается по капитальным затратам на реализацию способа и стоимости потерь энергии при регулировании. Здесь следует говорить, в основном, о потерях мощности, особенно в настоящее время, когда цены на энергоресурсы неуклонно растут и принята государственная программа по энергосбережению.

Потери мощности в ДПТ независимого возбуждения

$$\Delta P = P_1 - P_2 = UI_a - M\omega \cong P_1 \Delta\omega^*, \quad (3.10)$$

где $\Delta\omega^* = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ — относительный перепад скорости.

Видно, что при снижении скорости, например в 2 раза, т. е. $\Delta\omega^* = 0,5$ и $D = 2$, половина мощности теряется в цепи якоря и КПД привода не превышает 50% (при КПД самой машины $\eta \approx 0,8 \div 0,9$). Поэтому такой способ регулирования может быть рациональным только в маломощных приводах, когда удельный вес стоимости электроэнергии невелик.

1. Допустимая нагрузка (момент на валу) по условиям нагрева

$$M_{доп} = C\Phi_n I_{ан} = M_n \quad (3.11)$$

равна номинальному моменту, если условия охлаждения такие же, как и в номинальном режиме, например независимая вентиляция.

Уравнения естественной и реостатных электромеханических характеристик:

$$\begin{aligned} \omega_e &= \frac{U - I_a R_a}{C\Phi}; \\ \omega_{ni} &= \frac{U - I_a (R_a + R_{adi})}{C\Phi}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Отсюда скорость на искусственной характеристике при токе I_{ai}

$$\omega_{ni} = \omega_{ei} \frac{U - I_a(R_a + R_{adi})}{U - I_{ai}R_a}. \quad (3.13)$$

По (3.13) строятся реостатные характеристики с использованием значений I_{ai} для конкретных R_{adi} .

Обратная задача — когда по заданной искусственной характеристике или отдельной ее точке определяется соответствующее сопротивление резистора $R_{ад}$ из соотношения

$$R_{ад} = \left(1 - \frac{\omega_{ni}}{\omega_e}\right) \cdot \left(\frac{U}{I_{ai}} - R_a\right). \quad (3.14)$$

Искусственные реостатные характеристики используются для ограничения тока и момента двигателей постоянного тока в переходных процессах и в первую очередь при пуске. В момент пуска двигатель находится в режиме короткого замыкания ($\omega = 0$, $E_a = 0$), и ток по естественной характеристике при этом

$$I_a = \frac{U}{R_a} = (10 \div 50) \cdot I_{ан},$$

так как

$$R_a^* = \frac{R_a}{R_n} = \frac{R_a I_{ан}}{U_{ан}} = (0,02 \div 0,1).$$

Допустимый ток по условиям на коллекторе $I_{адоп} = (2 \div 3)I_{ан}$ для двигателей общепромышленного назначения (для тяговых машин, например, допускаются кратковременные перегрузки по току до $(4 \div 5)I_{ан}$). Следовательно, ток (и момент) необходимо ограничивать, что и достигается введением резисторов $R_{ад}$ в цепь якоря. Пуск обычно осуществляют ступенчато, шунтируя по мере разгона сопротивления контакторами (см. рис. 3.9). При этом ток и момент не остаются постоянными. Для достижения высокой плавности пуска используется импульсное регулирование пускового сопротивления, с изменением соотношения продолжительности открытого и закрытого состояния тиристора. Установившиеся значения тока ($I_{уст}$) и скорости ($\omega_{уст}$) определяются величиной момента нагрузки.

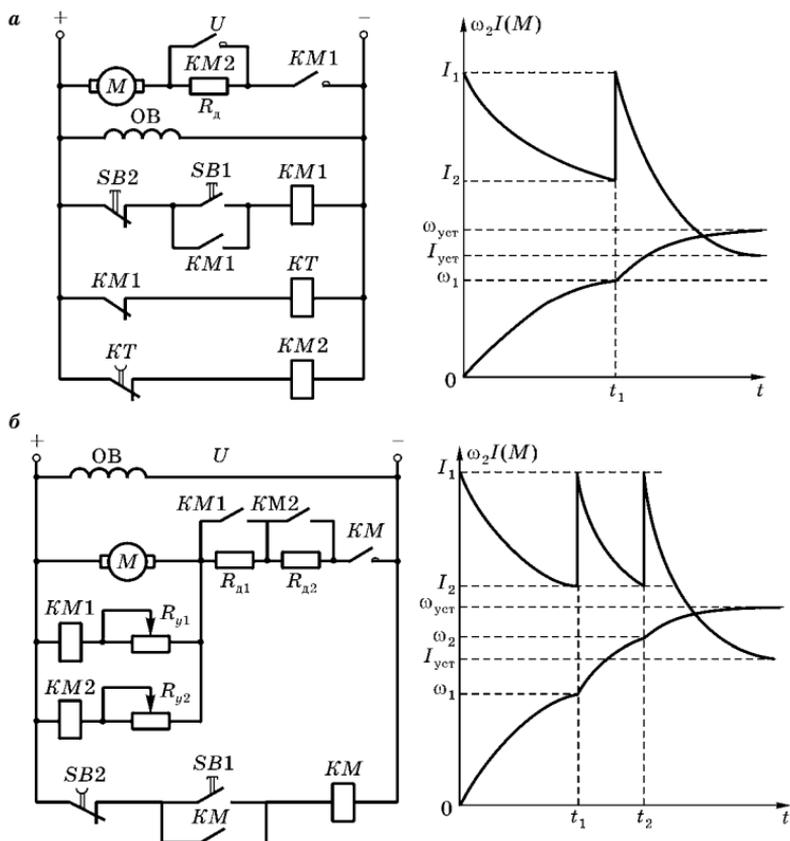


Рис. 3.9

Пуск ДПТ независимого возбуждения:

а — в одну ступень; б — в две ступени.

Необходимость введения добавочного сопротивления $R_{ад}$ в цепь якоря возникает также в режимах реверса и торможения противовключением. При этом пуск начинается при токе

$$I_1 = \frac{U}{R_a + R_{ад}} \quad (3.15)$$

в одну ступень. Разгон идет по характеристике 2 до значения тока I_2 , затем резистор $R_{ад}$ шунтируется и рабочая точка переходит на естественную характеристику 1, а ток изменяется до I_1 (рис. 3.10).

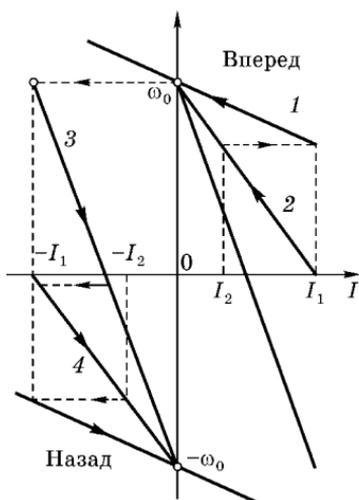


Рис. 3.10
Электромеханические
характеристики ДПТ
независимого возбуждения
при пуске и реверсе

Для осуществления режима противовключения необходимо изменить полярность напряжения на якоре и ввести дополнительно к $R_{ад1}$ резистор $R_{ад2}$ для ограничения тока. Рабочая точка переходит из ω_0 (ось ординат) на характеристику 3 (рис. 3.10).

При этом ток

$$I_1 = \frac{U + E}{R_a + R_{ад1} + R_{ад2}}. \quad (3.16)$$

Далее двигатель тормозится, ток уменьшается, так как уменьшается ЭДС E_a . При достижении скорости $\omega = 0$ процесс торможения заканчивается, ток

$$I = \frac{U}{R_a + R_{ад1} + R_{ад2}}. \quad (3.17)$$

Если требуется после остановки запустить двигатель в обратную сторону, то переходят на характеристику 4 (реостатную), а затем на естественную (назад). Следовательно, реверс включает в себя торможение противовключением и пуск в противоположном направлении. На практике управление пуском, реверсом и торможением осуществляется в функции времени, тока, на основе релейно-контакторных схем [3, 4, 53].

3.3.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ИЗМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Из 3.3–3.4 следует, что изменением магнитного потока можно регулировать скорость путем изменения скорости идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U}{C\Phi}.$$

Этот способ широко применяется на практике вследствие простоты его реализации и экономичности как в двигателях независимого, так и последовательного возбуждения.

Регулирование потока производится только в сторону его снижения (ослабление поля) путем уменьшения тока возбуждения i_b , так как магнитная система обычно насыщена и увеличение потока требует непропорционально большего тока i_b . Следовательно, регулирование — однозонное, вверх от номинальной.

Регулирование тока возбуждения двигателя независимого возбуждения осуществляется по схемам, представленным на рис. 3.11: с помощью резистора (рис. 3.11а), при незначительных мощностях; питание от управляемого выпрямителя (рис. 3.11б); по схеме «автотрансформатор — неуправляемый выпрямитель». Номинальному значению тока возбуждения соответствуют естественные характеристики, а при ослабленном поле — искусственные (ω_{01}, ω_{02}) (рис. 3.11в).

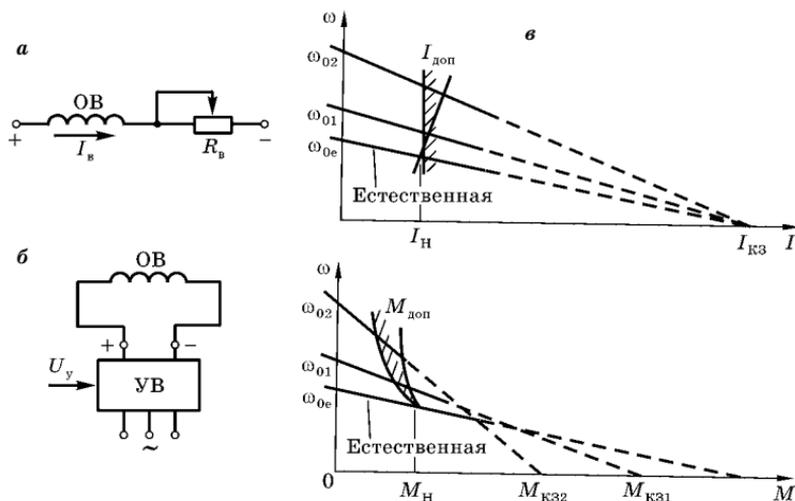


Рис. 3.11

Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения изменением магнитного потока:

а, б — схемы включения обмотки возбуждения; в — электромеханические и механические характеристики.

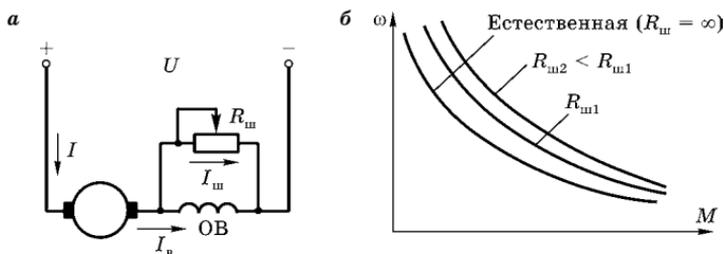


Рис. 3.12

Регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения шунтированием обмотки возбуждения:

a — схема включения; *б* — механические характеристики.

В двигателях последовательного возбуждения регулирование осуществляется шунтированием обмотки возбуждения резистором $R_{ш}$ (рис. 3.12). Изменяя сопротивление резистора, изменяют ток возбуждения. Величина тока якоря $I_a = I_b + I_{ш}$, отношение I_b/I_a называется степенью ослабления поля, которая может быть до 0,33, при этом диапазон изменения скорости $D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_n} \leq 3$.

Характеристики двигателей постоянного тока в режиме ослабления поля приведены на рис. 3.11*в* и 3.12*б*. Видно, что электрохимические характеристики двигателя независимого возбуждения пересекают ось токов в одной точке, так как ток короткого замыкания не зависит от i_b

$$I_{кз} = \frac{U}{R_a}.$$

Механические характеристики имеют разные значения момента короткого замыкания $M_{кз} = C\Phi I_{кз}$, так как при $I_{кз} = \text{const}$ с уменьшением потока уменьшается и момент.

Допустимая нагрузка (момент) при ослаблении поля определяется допустимым током, т. е. $I_{\text{доп}} = I_{\text{ан}}$.

$$M_{\text{доп}} = C\Phi_{\text{и}} I_{\text{ан}}, \quad (3.18)$$

где $\Phi_{\text{и}}$ — магнитный поток на искусственной характеристике. Так как $\Phi_{\text{и}} < \Phi_n$, то $M_{\text{доп}} < M_n$ (см. рис. 3.11*в*).

При условии, что ЭДС якоря на естественной и искусственной характеристиках примерно равны, следует

$$\begin{aligned} E_{ae} &= C\Phi\omega_n = U_n - I_{an}R_a; \\ E_{ai} &= C\Phi\omega_i = U_n - I_{an}R_a. \end{aligned} \quad (3.19)$$

При принятом допущении ($E_{ae} = E_{ai}$)

$$\Phi_n = \Phi_n \frac{\omega_i}{\omega_n}, \quad (3.20)$$

где ω_n — скорость на искусственной характеристике при $I_a = I_{an}$.

Используя (3.20) и (3.2), получим

$$M_{\text{доп}\omega_n} = M_{n\omega_n} = P_n = \text{const}. \quad (3.21)$$

Таким образом, на искусственных характеристиках двигатель может быть нагружен на номинальную мощность.

Отметим одну важную особенность. При работе тяговых двигателей с питанием от контактной сети возможны кратковременные отрывы токоприемника. Затем питание восстанавливается на вращающийся с той же скоростью двигатель, но при $I_a \approx 0$. Если обмотка возбуждения шунтирована только активным сопротивлением, то из-за большой индуктивности обмотки возбуждения ток пойдет в первый момент восстановления контакта с сетью только по шунту $R_{ш}$ (см. рис. 3.12). При этом ЭДС $E_a < E_{an}$ и ток включения может значительно превышать допустимое значение. Чтобы избежать этого, шунт делают активно-индуктивным, а индуктивность выбирают так, чтобы распределение токов было таким же, как в рабочих режимах. Такая конструкция шунта применяется и в приводах с резко изменяющейся нагрузкой (прокатные станы, камнедробилки и др.).

3.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ, ПОДВОДИМОГО К ЯКОРЮ

Из 3.3, 3.4 видно, что изменение подводимого к якорю напряжения позволяет в широких пределах регулировать скорость идеального холостого хода $\omega_0 = \frac{U}{C\Phi}$. При этом напряжение можно только уменьшать ниже номинального $U \leq U_n$, но в сочетании с ослаблением магнит-

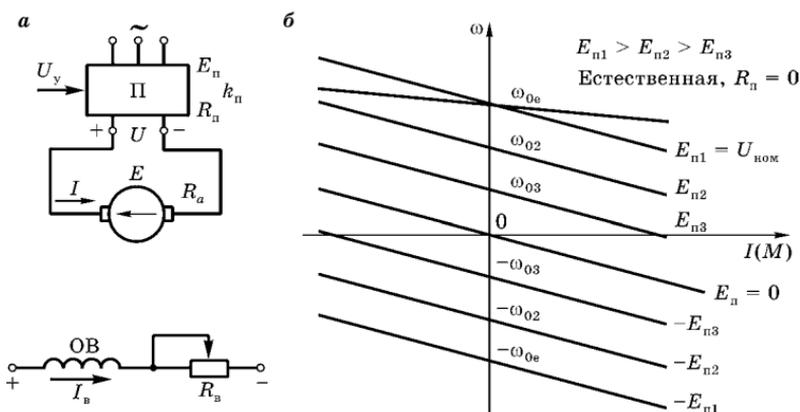


Рис. 3.13

Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения изменением подводимого к якорю напряжения:

a — схема включения; *б* — характеристики.

ного потока (регулирование вверх) получают двухзонное регулирование. Очевидно, что для реализации такого привода необходим источник регулируемого напряжения (преобразователь Π , рис. 3.13).

На практике нашли применение три системы: «генератор — двигатель» (Γ -Д); «управляемый выпрямитель — двигатель» ($УВ$ -Д); «широтно-импульсный преобразователь — двигатель» ($ШИП$ -Д). При этом обмотка возбуждения двигателя независимого возбуждения питается от отдельного источника постоянного тока, например от выпрямителя.

Сам преобразователь, в общем случае, характеризуется ЭДС E_{Π} , внутренним сопротивлением R_{Π} , коэффициентом усиления

$$k_{\Pi} = \frac{E_{\Pi}}{U_y},$$

где U_y — входной управляющий сигнал.

Напряжение на выходе преобразователя по внешней характеристике

$$U = E_{\Pi} - IR_{\Pi}. \quad (3.22)$$

Следовательно, формулы (3.3, 3.4) для электромеханической и механической характеристик будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega(I) &= \frac{E_{\text{п}}}{C\Phi} - \frac{I(R_a + R_{\text{п}})}{C\Phi} = \frac{k_{\text{п}}U_y}{C\Phi} - \frac{I(R_a + R_{\text{п}})}{C\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega; \\ \omega(M) &= \frac{E_{\text{п}}}{C\Phi} - \frac{M(R_a + R_{\text{п}})}{(C\Phi)^2} = \frac{k_{\text{п}}U_y}{C\Phi} - \frac{M(R_a + R_{\text{п}})}{(C\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega. \end{aligned} \right. \quad (3.23)$$

На рис. 3.13, 3.14 приведены схемы и механические характеристики двигателей постоянного тока, работающих по системе П–Д. Из рис. 3.13б видно, что с изменением ЭДС $E_{\text{п}}$ пропорционально изменяется и скорость идеального холостого хода ω_0 на искусственных характеристиках, а сами характеристики имеют меньшую жесткость

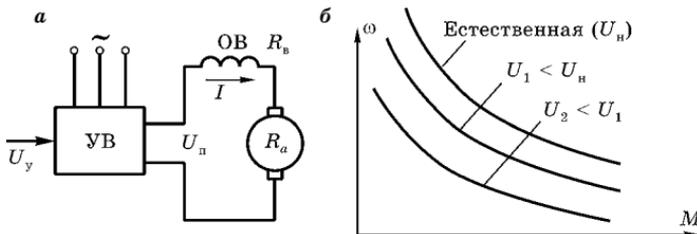


Рис. 3.14

Схема включения (а) и характеристики (б) ДПТ последовательного возбуждения при питании от управляемого преобразователя

(большой наклон) из-за наличия сопротивления $R_{\text{п}}$. Таким образом, перепад скорости $\Delta\omega$ увеличился. Естественная характеристика получена при $R_{\text{п}} = 0$, т. е. при питании от источника напряжения. При этом I и II квадранты соответствуют режимам двигателя и генератора при прямом вращении, а III и IV — при обратном. При $E_{\text{п}} = 0$ ДПТ работает в режиме динамического торможения.

3.4.1. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПО СИСТЕМЕ «ГЕНЕРАТОР — ДВИГАТЕЛЬ»

Система «генератор — двигатель» использовалась долго и успешно для регулирования координат в приводах постоянного тока в широком диапазоне мощностей. По сути схема не претерпела изменений и по сей день, действуя как электротрансмиссия в транспортных системах: тепловозы, большегрузные автомобили, суда, специальная

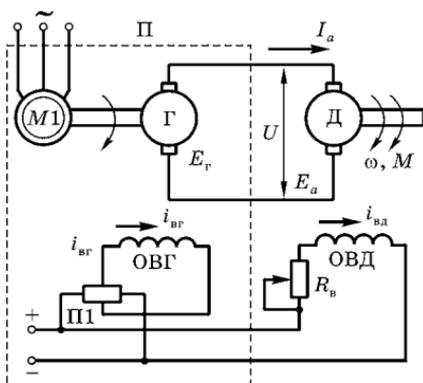


Рис. 3.15
 Схема электропривода
 по системе «генератор —
 двигатель»

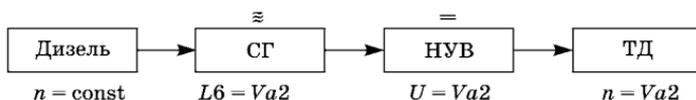


Рис. 3.16

Структурная схема электротрансмиссии транспортного средства

строительная техника, приводы, работающие от автономных источников ЭЭ. В качестве первичного двигателя выступают дизель, турбина — газовая или паровая. Генератор постоянного тока уступил место более мощному и надежному синхронному. Следующее звено в системе — неуправляемый выпрямитель. Последнее звено — двигатель постоянного тока, вентильный с преобразователем, асинхронный в совокупности с преобразователем частоты. Структурная схема системы — на рис. 3.16. При этом постоянная составляющая напряжения на зажимах выпрямителя в режиме холостого хода $E_{ср0}$ определяется по табл. 3.1.

Приведенные на рис. 3.13б характеристики соответствуют использованию схемы Г–Д (рис. 3.15). Генератор постоянного тока приводится во вращение асинхронным двигателем $\omega \approx \text{const}$, а напряжение на якоре ДПТ регулируется изменением тока возбуждения генератора $i_{вг}$. Якорь генератора (сопротивления обмотки $R_{аг} \rightarrow R_{п}$) непосредственно электрически соединяется с якорем двигателя (электрический вал). Регулирование скорости изменением ЭДС E_g может сочетаться с ослаблением поля двигателя, что

обеспечивает двухзонное регулирование: от нуля до номинальной — изменением E_r , выше номинальной — изменением тока возбуждения двигателя $i_{вд}$.

Основные достоинства системы «генератор — двигатель» (Г–Д): большой диапазон и плавность регулирования скорости ДПТ, высокая жесткость характеристик, реализация всех энергетических режимов работы ДПТ.

Основной недостаток — утроенная установленная мощность электрических машин, следовательно, снижение КПД, инерционность регулирования и высокая стоимость.

В промышленности, сельском хозяйстве при централизованном электроснабжении приводы по системе Г–Д практически не используются. На смену пришли системы УВ–Д и ШИП–Д, причем сами преобразователи выпускаются различными фирмами в широком ассортименте.

3.4.2. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПО СИСТЕМЕ «УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ — ДВИГАТЕЛЬ»

Основным типом преобразователей, применяемых в настоящее время в регулируемом электроприводе постоянного тока, являются полупроводниковые управляемые выпрямители (УВ) и широтно-импульсные преобразователи (ШИП).

Схемы электроприводов (УВ–Д) (рис. 3.17) собраны на управляемых полупроводниковых приборах (V1–V6), могут быть неререверсивными (рис. 3.17а) и реверсивными (рис. 3.17б). Чаще используются трехфазные схемы, в качестве полупроводниковых приборов — тиристоры и транзисторы. УВ обеспечивает выпрямление и регулирование напряжения на ДПТ за счет изменения среднего значения ЭДС преобразователя E_n . Достигается это регулированием угла управления вентилей α , т. е. задержкой их открытия (рис. 3.18).

При $\alpha = 0$ (рис. 3.18а) преобразователь работает как неуправляемый выпрямитель, к двигателю приложено полное выпрямленное напряжение. Если импульсы от системы управления (СУ) будут подаваться со сдвигом на

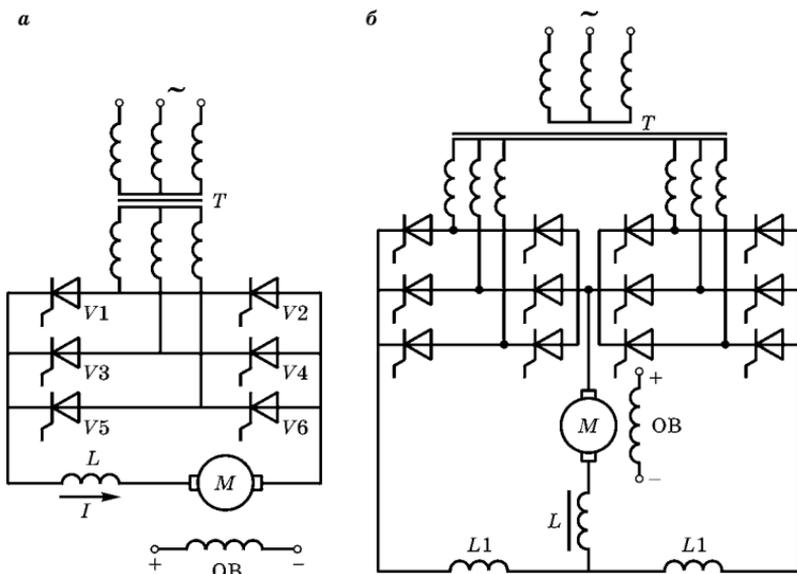


Рис. 3.17

Схемы электропривода по системе
«управляемый выпрямитель — двигатель» (УВ-Д):

a — нереверсивная; *б* — реверсивная.

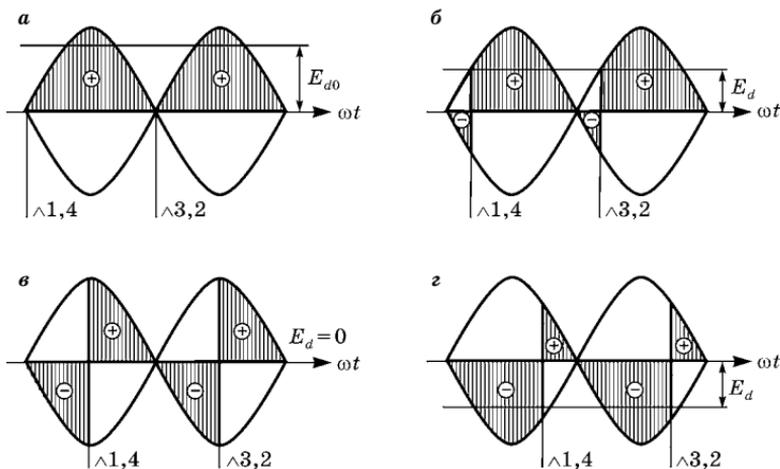


Рис. 3.18

Диаграммы напряжений однофазного мостового
тиристорного преобразователя:

a — при $\alpha = 0$; *б* — при $\alpha = \pi/4$; *в* — при $\alpha = \pi/2$; *г* — при $\alpha = 3\pi/4$.

угол $\alpha \neq 0$, то ЭДС $E_{\text{п}}$ снизится, а ее величина определяется как [5, 58]

$$E_d = E_{\text{ср}} = U_a = \frac{\sqrt{2}E}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha = E_{\text{ср}0} \cos \alpha, \quad (3.24)$$

где $E_{\text{ср}0}$ или E_{d0} — среднее значение выпрямленной ЭДС при холостом ходе выпрямителя и $\alpha = 0$; E — действительное значение переменной фазной ЭДС; m — кратность частоты переменной составляющей выпрямленного напряжения к частоте сети, зависящая от схемы выпрямления и называемая *числом фаз выпрямления* или *пульсностью выпрямителя*. В табл. 3.1 приведены основные соотношения для различных схем выпрямления.

ЭДС преобразователя имеет пульсирующий характер (см. рис. 3.18), а пульсации тока зависят от количества фаз, угла регулирования и индуктивности якорной цепи. В трехфазных схемах пульсации ЭДС и тока меньше, а в цепь якоря зачастую включают еще дополнительно индуктивность L (см. рис. 3.17).

Уравнения электромеханической и механической характеристик ДПТ, питаемого от вентильного преобразователя, имеют вид [3, 4, 5]

$$\begin{cases} \omega(I) = \frac{E_{\text{ср}0} \cos \alpha}{C\Phi} - \frac{I(R_a + R_{\text{п}})}{C\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega; \\ \omega(M) = \frac{E_{\text{ср}0} \cos \alpha}{C\Phi} - \frac{M(R_a + R_{\text{п}})}{(C\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega. \end{cases} \quad (3.25)$$

Таблица 3.1

Основные соотношения для различных схем выпрямления

Название схемы	№ рис.	Выпрямленная ЭДС E	Средний ток вентиль	Типовая мощность трансформатора	Пульсность
Однофазная мостовая	3.18	$0,9E_{2\phi}$	$0,5I_d$	$1,11P_d$	2
Трехфазная мостовая	3.17	$1,3E_{2\phi}$	$0,33I_d$	$1,045P_d$	6
Однофазная двухполупериодная со средней точкой		$0,9E_{2\phi}$	$0,5I_d$	$1,34P_d$	2
Трехфазная со средней точкой		$1,17E_{2\phi}$	$0,33I_d$	$1,35P_d$	3

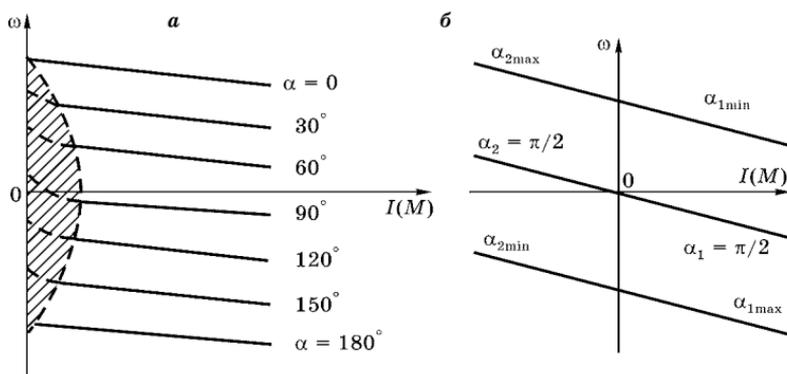


Рис. 3.19

Характеристики нереверсивного (а) и реверсивного электроприводов при совместном линейном управлении (б)

Здесь R_{Π} — эквивалентное сопротивление преобразователя, включающее: приведенные к вторичной обмотке активное и индуктивное сопротивления фазы трансформатора; сопротивление сглаживающего дросселя L ; сопротивления самих вентилях, обусловленных как процессом коммутации, так и прямым падением напряжения.

Характеристики по (3.25) приведены на рис. 3.19. Их особенностью является наличие зоны прерывистых токов в области малых нагрузок и, особенно, больших углов α .

Величина R_{Π} , как и в системе Г–Д, приводит к уменьшению жесткости характеристик. При $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ они соответствуют двигательному режиму; при $\alpha = 90^\circ$, $E_{\Pi} = 0$ — режим динамического торможения; при $\alpha > \frac{\pi}{2}$ ЭДС изменяет знак, привод работает в генераторном режиме (торможение) с отдачей энергии в сеть, а преобразователь — в режиме инвертора (рис. 3.18б, в, г).

Для получения характеристик во всех четырех квадрантах (рис. 3.19б) используют реверсивные УВ, построенные из двух комплектов нереверсивных (см. рис. 3.17б), или обеспечивают изменение направления тока возбуждения двигателя в схеме с нереверсивным УВ. В приводе по схеме на рис. 3.17б управление обоими мостами (выпрямителем α_1 и инвертором α_2) осуществляется так, что

$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$ (см. рис. 3.19б) (совместное линейное согласование углов управления). При этом $\alpha_1 = \pi - \alpha_2$, крайние характеристики (вверх и вниз) соответствуют $\alpha_{2 \max}$, $\alpha_{1 \min}$ и $\alpha_{2 \min}$, $\alpha_{1 \max}$.

Условия реализации инверторного режима преобразователя, т. е. отдачи энергии в сеть, например при торможении:

1. В цепи выпрямленного тока должен быть источник ЭДС, которая выше средней выпрямленной ЭДС инвертора; т. е. ЭДС якоря $E_a > E_{cp}$ (или E_d).

2. Подключение якоря к преобразователю должно обеспечивать протекание тока под действием ЭДС E_a .

3. Угол управления тиристорами должен быть больше $\alpha > \frac{\pi}{2}$.

Эти условия соблюдаются в реверсивном приводе по рис. 3.17б.

Привод по системе УВ–Д оказывает неблагоприятное воздействие на сети электроснабжения из-за искажения синусоидальной формы напряжения и появления высших гармоник. Сказанное приводит к снижению коэффициента мощности, дополнительным потерям в двигателях, усилению шумов и вибрации.

Особо отметим, что полезная мощность обусловлена только первой гармоникой тока $I_{1.1}$, а отношение

$$v = \frac{I_{1.1}}{I_1}$$

называется коэффициентом искажения тока (I_1 — действующее значение тока).

Коэффициент *вентильного электропривода*

$$\chi = \frac{P}{S}; \chi_{\text{нуз}} = \frac{vU_1 I_1}{U_1 I_1}; \chi_{\text{ув}} = v \cos \varphi, \quad (3.26)$$

где P — активная мощность, потребляемая из сети; $S = U_1 I_1$ — полная мощность (для однофазного выпрямителя); U_1, I_1 — действующее значение напряжения сети и потребляемого тока; v — коэффициент искажения; φ — угол сдвига основной гармоники тока, потребляемого из сети, и напряжения.

В наиболее употребляемых схемах УВ–Д при работе на активно-индуктивную нагрузку с непрерывностью выходного тока и любым t выходное напряжение [58]

$$\begin{aligned} E_{\text{ср}} &= E_{\text{ср}0} \cos \varphi; \\ \cos \varphi &\cong \cos \alpha = \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{ср}0}}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Достоинства системы привода УВ–Д:

1. Высокая плавность регулирования.
2. Большой диапазон регулирования: в разомкнутых системах — до 10, в замкнутых системах за счет уменьшения значения ω_{min} — до 1000 и более.
3. Высокий КПД электропривода в целом, учитывая высокие значения КПД трансформатора (до 0,98) и выпрямителя (0,9÷0,95). Здесь важно отметить, что суммарная доля потерь, сопутствующих регулированию скорости, равна сумме потерь в выпрямителе и в двигателе ($\Delta P_{\text{ув}} + \Delta P_a$), остается практически неизменной и не зависит от диапазона регулирования (при конкретном токе I_a).

Следовательно,

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{M\omega}{M\omega + \Delta P_{\text{ув}} + \Delta P_a}. \quad (3.28)$$

Очевидно, что со снижением скорости КПД установки уменьшается, что является общим свойством всех регулируемых приводов.

4. Бесшумность работы, простота обслуживания при эксплуатации.

Недостатки системы УВ–Д:

1. Пульсации напряжения, тока и момента ДПТ требуют применения сглаживающего дросселя.
2. В режиме прерывистых токов резко падает жесткость характеристик, а сами они нелинейны.
3. С ростом диапазона регулирования (увеличение угла α) снижается коэффициент мощности $\cos \varphi$ электропривода, $\cos \varphi \approx \cos \alpha$. Отметим, что φ — угол сдвига между синусоидальным напряжением на зажимах трансформатора и первой гармоникой тока.

4. Такой привод вносит искажения в форму тока и напряжения источника, негативно влияет на работу других

потребителей, требует применения дополнительного оборудования.

Кроме того, большое значение имеют вопросы электромагнитной совместимости (соблюдение высоких требований по монтажу).

Несмотря на указанные недостатки, привод типа УВ–Д является основным регулируемым промышленным приводом постоянного тока при мощностях до нескольких тысяч киловатт.

3.4.3. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПО СИСТЕМЕ «ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ»

Схема включения двигателя постоянного тока и диаграмма напряжения U , тока I и момента M при импульсном регулировании напряжения показаны на рис. 3.20. Основной частью ШИП является полупроводниковый ключ ТК, который периодически подключает источник постоянного напряжения к двигателю (время импульса t_1) и отключает (время паузы t_2).

Ранее использовались тиристорные ключи, которые работали при частотах не более 1000 Гц. Кроме того, для запираания тиристора требуется специальная дополнительная схема (узел искусственной коммутации) [5, 7, 32, 58]. В настоящее время применяются ключи на тиристорах ГТО и транзисторах iGBT при частотах до 20 кГц, следовательно, пульсациями тока и момента на работу двигателя можно пренебречь.

Такие системы могут получать питание как от источника постоянного тока (контактная сеть для транспорта, аккумуляторная батарея и др.), так и переменного через неуправляемый выпрямитель. Из сети потребляется импульсный ток i за время импульса t_1 , а при закрытом ключе ток в цепи якоря поддерживается за счет ЭДС самоиндукции, он протекает через диод V2. Диод VT1 является неотъемлемой частью транзистора VT.

Величина пульсаций тока (рис. 3.20в) зависит от частоты работы ТК, соотношения длительности интервалов t_1 и t_2 и индуктивности якорной цепи.

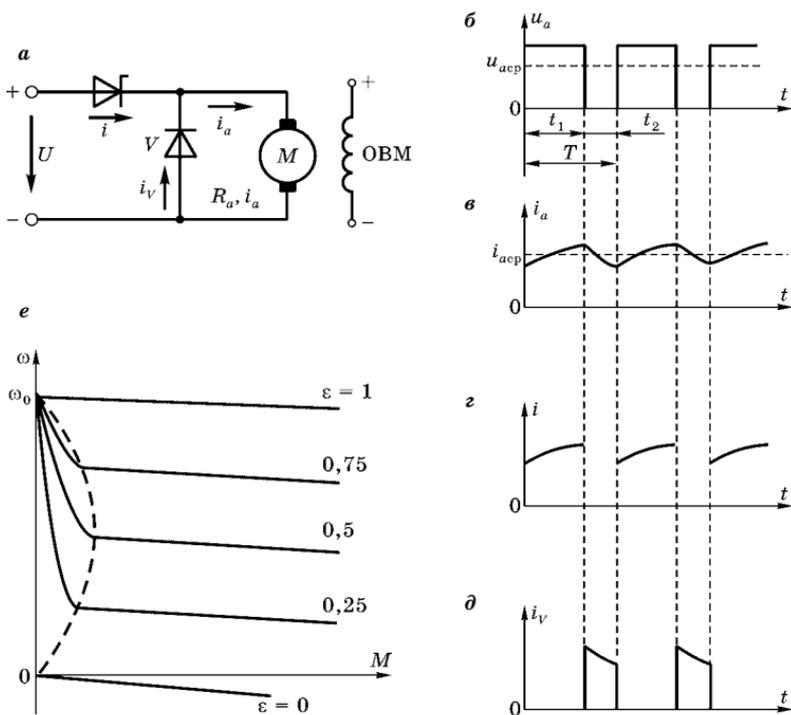


Рис. 3.20

Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения по системе «широтно-импульсный преобразователь — двигатель» (ШИП—Д):

a — схема включения; *б* — диаграмма напряжений на якоре; *в*, *г*, *д* — диаграммы токов якоря (*в*), потребляемого из сети (*г*), обратного диода (*д*); *е* — характеристики при различных значениях.

Относительная продолжительность импульсов напряжения

$$\gamma = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{t_1}{T}, \quad (3.29)$$

где $T = t_1 + t_2$ — период коммутации ключа.

Среднее значение напряжения на якоре

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_u} U_a(t) dt = \gamma U, \quad (3.30)$$

где U — напряжение сети.

Изменяя плавно величину γ сигналами управления, можно регулировать напряжение на якоре $U_{\text{ср}}$ практически

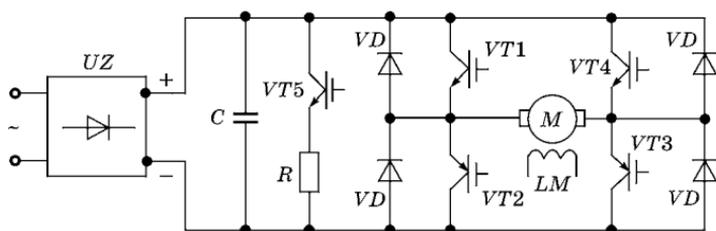


Рис. 3.21
 Схема реверсивного электропривода постоянного тока
 по системе ШИП-Д

от нуля до U_c . В сочетании с ослаблением поля двигателя возможно двухзонное регулирование скорости, как в системах Г-Д, УВ-Д.

Схема, показанная на рис. 3.20, не обеспечивает режимы реверса, рекуперативного торможения, поэтому в практике она применяется редко. На рис. 3.21 в качестве примера приведена схема преобразователя, содержащая четыре ключа $VT1 \div VT4$ с независимыми системами управления, позволяющая осуществить указанные выше режимы [4]. Резистор R , ключ $VT5$ (тормозной прерыватель) обеспечивают режим динамического торможения. Емкость C служит как для сглаживания напряжения, так и для приема энергии торможения (накопитель).

Уравнение механической характеристики для режима непрерывного тока без учета падения напряжения на ключе будет

$$\omega(M) = \frac{\gamma U}{C\Phi} - \frac{MR_a}{(C\Phi)^2}. \quad (3.31)$$

Форма характеристик (рис. 3.20e) не отличается от приведенных на рис. 3.13, но их жесткость в системе ШИП-Д больше.

Диапазон регулирования в разомкнутых системах ограничен статическим падением скорости $\Delta\omega$, обусловленным сопротивлением якорной цепи. Поэтому при $R_a^* = \frac{R_a I_{ан}}{U_{ан}} = 0,05$ $D \approx 20$, а при $R_a^* = 0,02$ $D \approx 50$.

В замкнутых системах пределы регулирования скорости ограничиваются техническими возможностями реа-

лизации $\gamma_{\max} \approx 0,97 \div 0,98$ и $\gamma_{\min} \approx 0,03 \div 0,02$, поэтому достижимый диапазон регулирования $D \approx 50$ [4].

Энергетические характеристики регулирования подобны системе УВ–Д, с той лишь разницей, что здесь при высоких частотах коммутации резко возрастают потери в ключах. Очевидно, что КПД привода зависит от мощности двигателя, и чем она больше, тем выше КПД.

3.5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ранее (см. 1.3) было показано, что в разомкнутых системах из-за значительного перепада скорости $\Delta\omega$, зависящего от изменения нагрузки, сопротивления якорной цепи двигателя R_a и внутреннего сопротивления преобразователя R_{Π} , не удается получить большой диапазон регулирования скорости и обеспечить высокую точность. Другими словами, в таких системах недостаточная жесткость механических характеристик.

Для расширения диапазона регулирования и повышения точности используются замкнутые системы (см. 1.3). Сама идея (суть) замкнутых систем регулирования сводится к тому, что воздействие возмущающих факторов автоматически компенсируется повышением напряжения U на выходе преобразователя, или ЭДС E_{Π} . Следовательно, информация о значении регулируемой величины должна поступать на вход системы и суммироваться с задающим сигналом. Эту роль выполняют обратные связи — отрицательные и положительные, жесткие и гибкие по скорости, току, моменту, напряжению и др. Как правило, энергии сигнала рассогласования (суммы задающего и обратной связи) недостаточно для воздействия на регулирующий орган (преобразователь), поэтому в системе необходим усилитель $У$. Перечисленные элементы в совокупности образуют регулятор, который и осуществляет процесс регулирования.

На рис. 3.22 приведена структурная схема системы автоматического регулирования (САР) скорости с жесткой отрицательной обратной связью по напряжению U_a

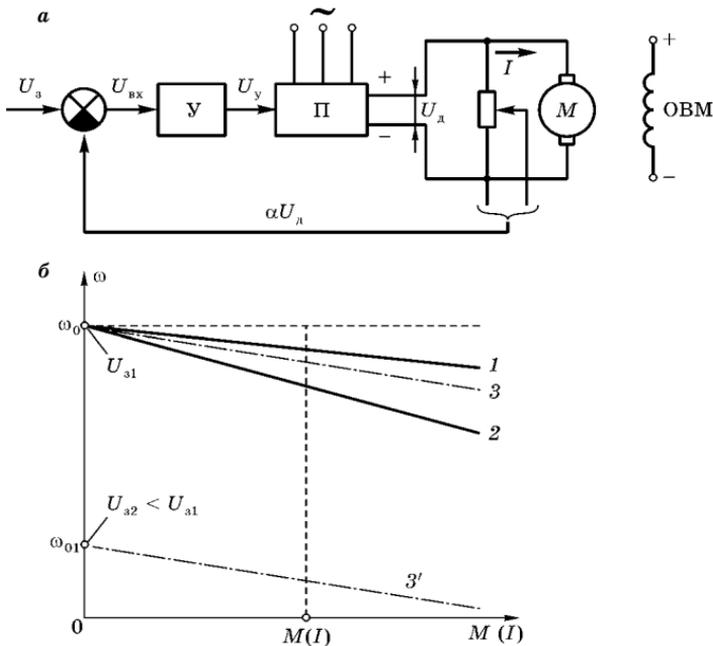


Рис. 3.22

Структурная схема системы автоматического регулирования скорости ДПТ с жесткой отрицательной обратной связью по напряжению (а) и характеристики двигателя (б)

на якоре двигателя независимого возбуждения (например, УВ-Д, Г-Д, ШИП-Д) [3,4,5].

Для установившегося режима система уравнений элементов

$$\begin{cases} U_{\text{вх}} = U_3 - \alpha U_a; E_{\text{п}} = k_y k_{\text{п}} U_{\text{вх}}; \\ U_a = E_{\text{п}} - I R_{\text{п}}; U_a = E_a + I_a R_a; \\ E_a = C \Phi \omega; M = C \Phi I_a, \end{cases} \quad (3.32)$$

где $k_y = \frac{U_y}{U_{\text{вх}}}$ — коэффициент усиления усилителя; $k_{\text{п}} = \frac{E_{\text{п}}}{U_y}$ — коэффициент усиления преобразователя; U_y — напряжение, которое определяет угол регулирования α в УВ, ток возбуждения генератора в системе Г-Д, относительную продолжительность импульсов ШИП; $E_{\text{п}}$ и E_a — ЭДС преобразователя и якоря двигателя; $R_{\text{п}}$, R_a — внутренние со-

противления преобразователя и якорной цепи двигателя;

$k_{\Pi} = \frac{U_{oc}}{U_y}$ — коэффициент обратной связи по напряжению.

Уравнение механической характеристики в замкнутой системе

$$\omega(M) = \frac{k_c U_3}{C\Phi(1 + \alpha k_c)} - M \frac{R_{\Pi} + R_a(1 + \alpha k_c)}{(C\Phi)^2(1 + \alpha k_c)}, \quad (3.33)$$

где $k_c = k_y \cdot k_{\Pi}$ — общий коэффициент усиления системы.

В этом уравнении первый член представляет скорость идеального холостого хода ω_0 , пропорциональную задающему сигналу U_3 , (характеристики 3, 3' на рис. 3.22б соответствуют различным значениям задающего сигнала U_3).

Жесткость механической характеристики в такой системе даже при $k_c \rightarrow \infty$ не выше жесткости естественной характеристики двигателя при питании от источника напряжения, т. е. при $R_{\Pi} = 0$ (характеристика 1 на рис. 3.22б). Действительно, в данной системе посредством обратной связи компенсируется лишь падение напряжения на внутреннем сопротивлении R_{Π} источника. Поэтому такая САР не может обеспечить большой диапазон регулирования и не обладает высокой точностью поддержания скорости из-за низкой жесткости характеристики — не много больше, чем в разомкнутой системе (характеристика 2).

На рис. 3.23 изображена структурная схема САР скорости с жесткой отрицательной обратной связью по скорости. В качестве датчика обратной связи здесь используется тахогенератор ГТ с электромагнитным возбуждением (ОВГТ). Принцип действия такой системы заключается в следующем. С ростом момента на валу двигателя возрастает ток I_a , скорость его снижается, так как увеличивается падение напряжения на сопротивлениях цепи якоря $I_a R_a$ и преобразователя $I R_{\Pi}$. При этом уменьшаются ЭДС тахогенератора, сигнал обратной связи $\gamma\omega$, увеличивается сигнал рассогласования $U_{вх}$ на входе усилителя (при $U_3 = \text{const}$). Следовательно, возрастает ЭДС преобразователя П, что автоматически приводит к компенсации снижения скорости [3, 4, 13].

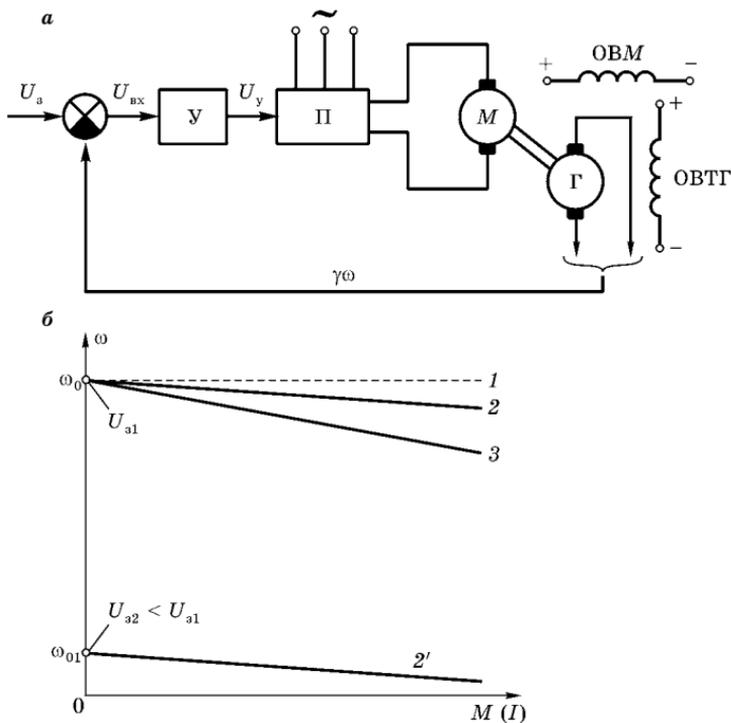


Рис. 3.23

Структурная схема системы автоматического регулирования скорости с жесткой отрицательной обратной связью по скорости (а) и характеристики двигателя (б)

Система уравнений для схемы, показанной на рис. 3.23

$$\begin{aligned} U_{\text{вх}} &= U_a - \gamma\omega; E_{\text{п}} = k_c U_{\text{вх}}; \\ U_a &= E_{\text{п}} - IR_{\text{п}}; U_a = E_a + I_a R_a; \\ E_a &= C\Phi\omega; M = C\Phi I_a, \end{aligned} \quad (3.34)$$

где U_3 — задающее напряжение в системе с обратной связью, как и в предыдущем случае; $\gamma = \frac{U_{\text{oc}}}{\omega}$ — коэффициент передачи обратной связи по скорости.

Выражение для механической характеристики

$$\omega(M) = \frac{kU_3}{1+k\gamma} - M \frac{R_{a\Sigma}}{(C\Phi)^2(1+k\gamma)} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (3.35)$$

где $k = \frac{k_c}{C\Phi} = \frac{k_y k_n}{C\Phi}$ — коэффициент передачи (усиления) всей системы; $R_{a\Sigma} = R_a + R_n$ — общее сопротивление якорной цепи.

При $k = \text{const}$ (k_y , k_n , Φ — постоянные) характеристики линейны. Статизм в такой системе регулирования при $M = M_n$ определится как

$$\delta = \frac{M_n R_{a\Sigma}}{(C\Phi)^2 k U_s}. \quad (3.36)$$

Статизмом механической характеристики системы электропривода называется отношение изменения скорости двигателя $\Delta\omega$ на валу от идеального холостого хода до номинального значения к скорости идеального холостого хода на заданной регулировочной характеристике, $\delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_{op}}$ [2, 3, 4].

Отсюда видно, что статизм уменьшается с ростом коэффициента усиления k . В пределе при $k \rightarrow \infty$ можно получить абсолютно жесткую характеристику (1, рис. 3.23б). При конечных значениях k характеристики (2.2) более жесткие, чем в разомкнутой системе (3, рис. 3.22б).

Увеличение коэффициента усиления в таких САР ограничено их динамической устойчивостью (в переходных режимах) и чувствительностью к помехам. Ограничение на коэффициент усиления системы предопределяет и ограничения на диапазон регулирования. Система автоматического регулирования с обратной связью по скорости реагирует на все возможные внешние возмущения: изменение момента на валу, напряжения питания U_a , магнитного потока Φ , сопротивления цепи. Она обладает лучшей стабильностью среди существующих систем, диапазон регулирования достигает значения $D = 2000$ [3, 4, 13].

На практике используются САР и с другими обратными связями: системы регулирования момента, скорости и момента, комбинированные и др. [4, 8].

При необходимости ограничения тока (момента) используется схема, показанная на рис. 3.24. Схема содержит узел токовой отсечки, имеющий нелинейную харак-

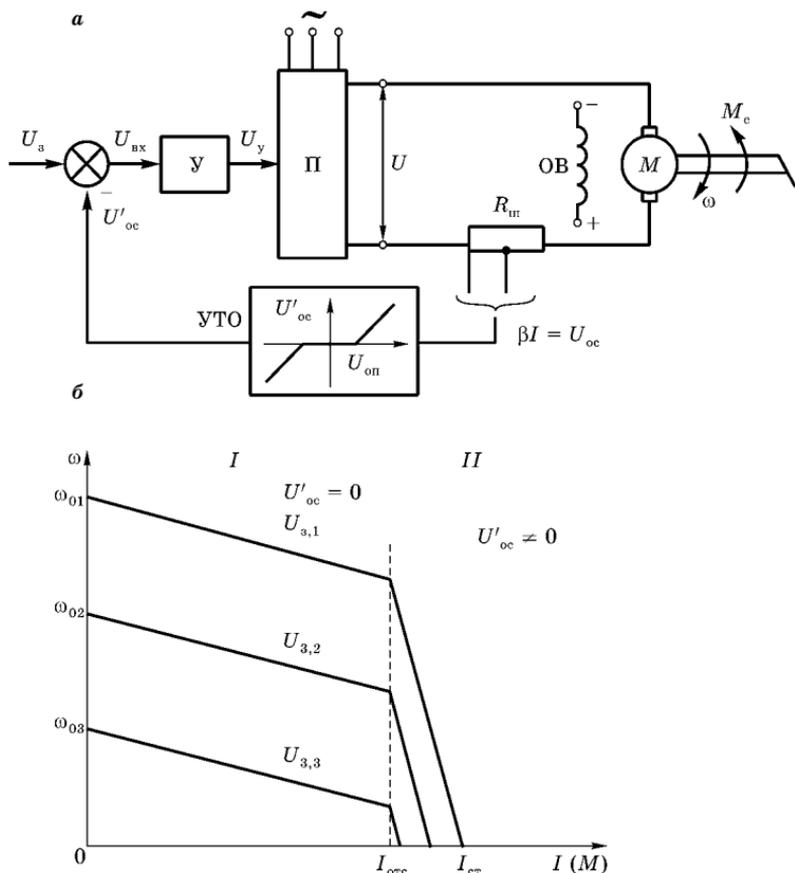


Рис. 3.24

Структурная схема замкнутой системы регулирования с нелинейной обратной связью по току (с отсечкой по току, моменту) (а), механические характеристики (б)

теристика (рис. 3.23а). При этом на первом участке (I, рис. 3.24б) сигнал обратной связи $U'_{oc} = 0$. При $U'_{oc} > U_{оп}$ ($U_{оп}$ — опорное напряжение, оно задается) на вход системы поступает сигнал отрицательной обратной связи U . Значение $U_{оп}$ определяется током I , с которого начинается регулирование. Он называется током отсечки $I_{отс}$. Таким образом, на участке I система является разомкнутой ($U = 0$), а при $I > I_{отс}$ — замкнутой, ограничивает ток I и момент M .

Ток $I_{ст}$ при $\omega = 0$ называется током стопорения. Приведенные на рис. 3.23б характеристики отличаются значениями сигнала задания U_3 по скорости, следовательно, и величинами ω_0 . Точность регулирования (ограничения) тока зависит от общего коэффициента усиления системы — чем он выше, тем больше характеристика на участке II приближается к вертикали.

На рис. 3.25 изображены схемы и характеристики замкнутой системы с обратными связями по скорости и току [8]. Схема позволяет получить характеристики с различной жесткостью на отдельных участках: высокую на рабочем участке I и малую на участке II, III для ограничения тока момента в переходных режимах. Это достигается использованием двух нелинейных обратных связей по скорости и току (рис. 3.25а) (УСО и УТО).

В зоне I в диапазоне токов $0 < I < I_{отс}$ действует только обратная связь по скорости, обеспечивая жесткие характеристики. При токе $I > I_{отс}$ вступает в действие обратная связь по току, и характеристики становятся мягче. При

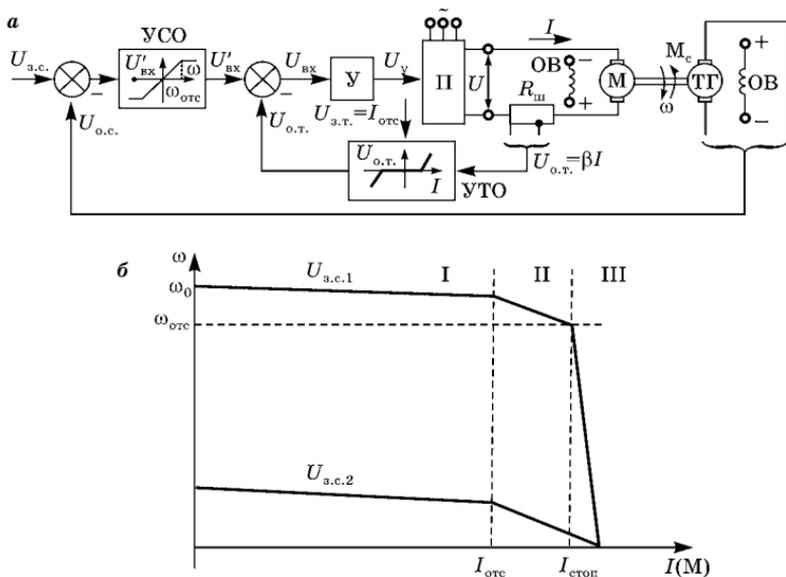


Рис. 3.25

Схема (а) и характеристики (б) замкнутой системы с обратными связями по скорости и току

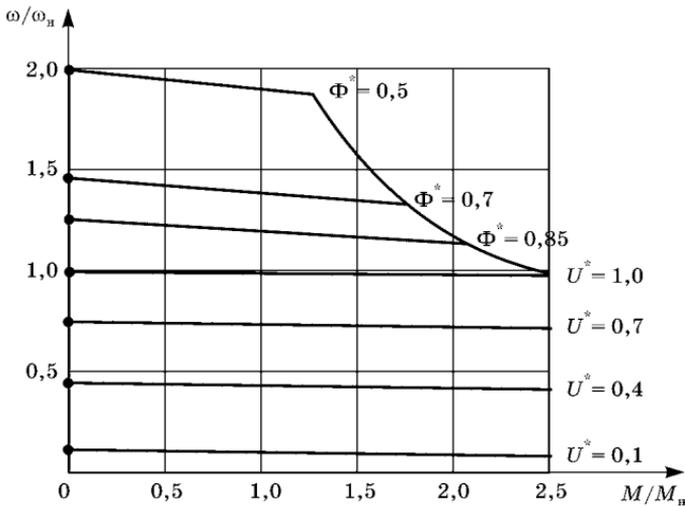


Рис. 3.26
Механические характеристики
при двухзонном регулировании скорости ДПТ

дальнейшем увеличении тока и снижении скорости $\omega < \omega_{отс}$ обратная связь по скорости перестает действовать, и за счет действия обратной связи по току характеристики становятся еще мягче (зона III), обеспечивая требуемое ограничение тока и момента.

При регулировании напряжения и тока возбуждения ДПТ регулирование скорости будет двухзонным, вниз и вверх — от номинальной (рис. 3.26).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные способы регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
2. Как изменится скорость двигателя постоянного тока при уменьшении тока возбуждения, если момент на валу не превышает номинальный?
3. Почему при увеличении скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения выше номинальной ослаблением поля снижается момент двигателя *при* $I_a = \text{const}$?
4. В чем суть двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения?
5. Какова должна быть ЭДС двигателя постоянного тока независимого возбуждения, чтобы он работал в режиме рекуперативного торможения?

6. В каких тормозных режимах может работать двигатель постоянного тока независимого возбуждения?
7. Приведите классификацию управляемых тиристорных выпрямителей, используемых в приводе ТП–Д.
8. Поясните принцип действия управляемого тиристорного выпрямителя.
9. Какова особенность тиристорного преобразователя для реверсивного электропривода по системе ТП–Д?
10. Каково должно быть соотношение между углами управления реверсивного тиристорного преобразователя, чтобы механические характеристики привода ТП–Д в двигательном и тормозном режимах были согласованы?
11. Поясните принцип действия силового транзисторного регулятора напряжения.
12. Что такое скважность импульсов?
13. Как зависит коэффициент мощности электропривода по системе ТП–Д от скорости (от угла управления)?
14. Как изменить направление вращения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения?
15. Назовите способы регулирования скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения; какой из этих способов более экономичный?
16. Почему двигатель постоянного тока последовательного возбуждения не может работать в режиме холостого хода?

4 ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Асинхронные двигатели (АД) общего назначения мощностью до 400 кВт на напряжение до 1000 В являются в настоящее время самым распространенным видом электродвигателей в промышленности и сельском хозяйстве. Это определяется рядом преимуществ АД по сравнению с другими типами двигателей: они более просты и надежны в эксплуатации, имеют меньшую стоимость, массу и габариты при той же мощности, хорошие пусковые и достаточно высокие энергетические характеристики (КПД от 0,7 до 0,95; $\cos \varphi$ от 0,7 до 0,92 в зависимости от мощности и частоты вращения).

Отечественная промышленность выпускает асинхронные короткозамкнутые двигатели общего назначения (основного исполнения) серий 4А и АИР, а также различные модификации: с повышенным пусковым моментом; с повышенным скольжением; многоскоростные; с фазным ротором; встроенным электромагнитным тормозом. Кроме того, выпускаются специализированные образцы по условиям окружающей среды, в том числе двигатели для сельского хозяйства.

Двигатели предназначены для работы от сети переменного синусоидального напряжения частотой 50 Гц. Допускается эксплуатация при отклонениях напряжения от -5 до $+10\%$ и частоты на $\pm 2,5\%$ номинального значения [5, 10, 24].

Оговариваются также коэффициенты несимметрии и несинусоидальности [10, 22]

$$\varepsilon_{\text{несим}} = \frac{U_{\text{обр}}}{U_{\text{ном}}} 100; k_{\text{несин}} = \frac{\sqrt{\sum_v U_v^2}}{U_{\text{ном}}}, \quad (4.1)$$

где $U_{\text{обр}}$ — напряжение обратной последовательности; U_v — напряжение v -й гармоники.

При этом $\varepsilon_{\text{несим}} \leq 2\%$; $k_{\text{несин}} = 5\%$.

На выводах асинхронных двигателей допускаются большие значения коэффициентов несимметрии и несинусоидальности, если нагрев двигателя при данной нагрузке не превышает допустимого.

Двигатели с повышенным пусковым моментом предназначены для привода механизмов с тяжелыми условиями пуска (компрессоры, поршневые насосы, транспортеры и др.) при синхронных частотах вращения 1500, 1000 и 750 об/мин. Двигатели с повышенным скольжением предназначены для привода механизмов с пульсирующей нагрузкой, а также механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме S3.

Многоскоростные АД служат для приводов механизмов, работающих при различных скоростях (регулирование — ступенчатое). Выпускаются двигатели двух-, трех- и четырехскоростные, например, 500/750/1000/1500 об/мин.

Двигатели с фазным ротором применяются для приводов с особо тяжелыми условиями пуска (центрифуги, сепараторы), в приводах при питании от источников сравнимой мощности: маломощных трансформаторов, дизель-генераторов, а при незначительных мощностях и для регулирования скорости.

На рис. 4.1 представлены элементы конструкции асинхронных двигателей. Короткозамкнутая обмотка («беличья клетка») чаще выполняется алюминиевой, заливкой жидким металлом пазов магнитопровода ротора вместе с короткозамыкающими кольцами. Фазный ротор имеет трехфазную обмотку с таким же числом полюсов, как и обмотка статора, выполненную изолированным проводом и соединенную в звезду. Начала обмотки выводятся на контактные кольца с наложенными на них щетками, через которые обмотка соединена с трехфазным резистором $R_{2д} = \text{var}$.

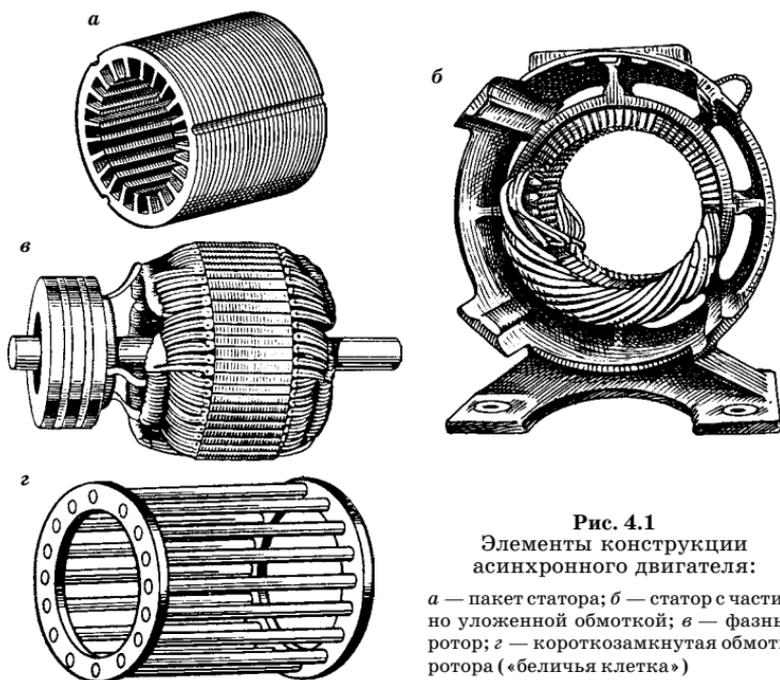


Рис. 4.1
Элементы конструкции
асинхронного двигателя:

a — пакет статора; *б* — статор с частично уложенной обмоткой; *в* — фазный ротор; *г* — короткозамкнутая обмотка ротора («беличья клетка»)

На рис. 4.2 приведены элементы конструкции двигателя DR фирмы SEW EURODRIVE [58].

Трехфазная якорная обмотка укладывается в пазы сердечника статора, соединяется в звезду или треугольник. Начала и концы обмотки выводятся на клеммы. Обмотка потребляет из сети ток I_1 , содержащий две составляющие: намагничивающий ток I_μ и нагрузочный (ток ротора) I_2' .

Электромагнитные процессы в АД во многом сходны с процессами в трансформаторе [20, 21, 23], когда передача и преобразование энергии осуществляется магнитным потоком взаимоиндукции (общим для обмоток статора и ротора потоком в зазоре $\Phi\delta$).

Токи статорной обмотки создают вращающееся со скоростью $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$ магнитное поле $B\delta(x, t) = B\delta_m \sin(\omega t - \alpha x)$, которое наводит ЭДС в обмотках статора и ротора. Ток обмотки ротора создает собственное магнитное поле, в результате взаимодействия которого с полем статора и со-

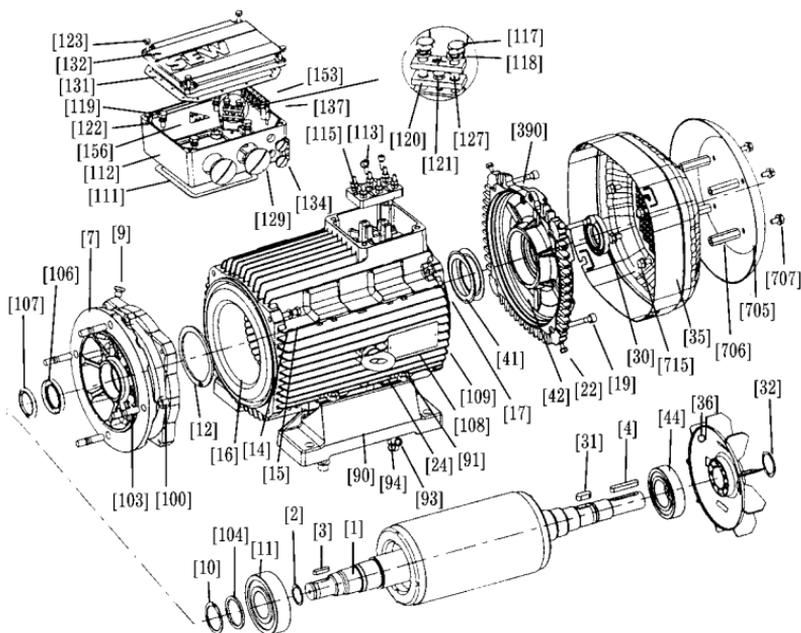


Рис. 4.2
Базовая конструкция двигателя DR.160:

1 — ротор; 2, 10, 12, 32 — стопорное кольцо; 3, 4, 31 — призматическая шпонка; 7 — фланец; 9 — резьбовая пробка; 11, 44 — радиальный шарикоподшипник; 14, 93 — шайба; 15, 22, 117, 119, 123, 707, 715 — винт с шестигранной головкой; 16 — статор; 17, 91, 100 — шестигранная гайка; 19, 94 — винт с цилиндрической головкой; 24 — рым-болт; 30, 106 — манжета; 35 — кожух крыльчатки; 36 — крыльчатка; 41 — тарельчатая пружина; 42 — подшипниковый щит со стороны, противоположной приводу; 90 — лапа; 103 — шпилька; 107 — отражательное кольцо; 108 — заводская табличка; 109 — просечной штифт; 111 — уплотнительная прокладка для нижней части; 112 — нижняя часть клеммной коробки; 113, 137 — винт; 115 — клеммная панель; 118 — стопорная шайба; 120, 127 — клеммы заземления; 121 — просечной штифт; 122 — стопорная шайба; 129, 134 — резьбовая пробка с кольцом круглого сечения; 131 — уплотнительная прокладка; 132 — крышка клеммной коробки; 153 — клеммная панель в сборе; 156 — указатель; 390 — кольцо круглого сечения; 705 — защитная крышка; 706 — распорка.

здается электромагнитный момент. Величина вторичной ЭДС $E_2 = 4,44f_2\Phi_8w_2k_{062}$ при прочих равных условиях определяется скольжением $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ или частотой $f_2 = sf_1$. При неподвижном роторе $s = 1$, $f_2 = f_1$ такой режим называется коротким замыканием.

До недавнего времени (70-е гг. XX в.) АД с короткозамкнутым ротором применялись, в основном, в регули-

лируемых электроприводах. Однако разработка и массовый выпуск полностью управляемых полупроводниковых приборов (силовых транзисторов *iGBT* и др.) и создание компактных и надежных преобразователей частоты обеспечил асинхронному регулируемому электроприводе доминирующие позиции при мощностях до 100–400 кВт и более, в том числе и при напряжениях до 10 000 В.

В настоящее время такие регулируемые приводы используются в насосных и вентиляторных установках, работающих с переменной подачей, грузоподъемных механизмах, технологических линиях пищевой и перерабатывающей промышленности, в различных сферах АПК.

4.2. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Эквивалентные схемы замещения, являющиеся электрическим аналогом электромеханических преобразователей энергии (ЭМП), широко используются для анализа работы электрических машин. Схемы состоят из пассивных элементов — сопротивлений и индуктивностей, соединенных таким образом, чтобы физические процессы для машины и схемы описывались одинаковыми уравнениями.

Асинхронный двигатель, как и любой ЭМП, представляет собой систему токо- и магнитопроводов, т. е. совокупность электрических и магнитных цепей. Электрические цепи — это обмотки статора и ротора, а магнитные — ферромагнитные элементы плюс воздушный зазор, по которому замыкается магнитный поток. От степени насыщения стальных участков зависят потокоцепления и индуктивности рассеяния обмоток, следовательно, режим магнитной цепи (индукция B , поток Φ) во многом определяет параметры электрической цепи, и наоборот.

Активные сопротивления схемы замещения (обмотки статора — R_1 и ротора — R_2) считают практически неизменными для рабочих режимов при скольжениях меньших критического (s_k), т. е. эффект вытеснения тока не учитывается. При этом основной магнитный поток в зазо-

ре $\Phi\delta$ остается постоянным, $\Phi\delta \approx \text{const}$ при $U = \text{const}$ [10, 20, 21]. Следовательно, индуктивности обмоток также практически постоянные.

При расчете пусковых режимов, когда вытеснением тока в обмотке короткозамкнутого ротора и насыщением зубцов от потоков рассеяния пренебречь нельзя, уточняются параметры по разработанным методикам [21].

Сами величины сопротивлений и индуктивностей рассчитываются по геометрическим размерам, физическим характеристикам материалов — удельной электропроводности γ и магнитной проницаемости μ [19, 20, 21].

На рис. 4.3 представлены: Т-образная схема замещения с приведенными к обмотке статора параметрами вторичной обмотки — r'_2, x'_2 (рис. 4.3а), подобная схеме замещения трансформатора, т. е. вращающийся ротор заменен неподвижным (эквивалентным) с соответствующими параметрами; Г-образная схема замещения с вынесенным на зажимы сети намагничивающим контуром

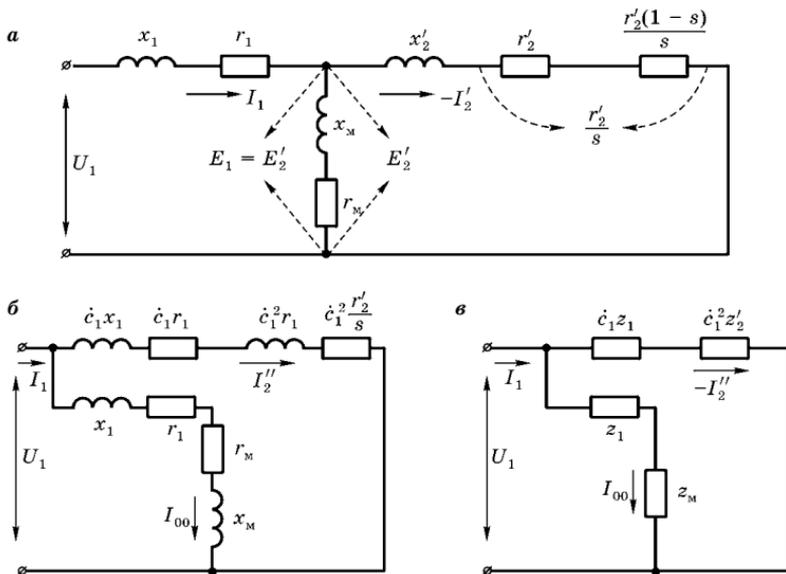


Рис. 4.3

Схемы замещения асинхронного двигателя:

а — Т-образная; б, в — Г-образная.

(рис. 4.3б, в), когда при $U_1 = \text{const}$ ток идеального холостого хода $I_{00} = \text{const}$.

Приняты следующие обозначения: U_1 — первичное фазное напряжение; I_1 — фазный ток статора; r_1 и x_1 — активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки статора; I_m, x_m, r_m — ток, индуктивное и активное сопротивления намагничивающего контура; $E_1 = E_2'$ — ЭДС первичной и приведенной вторичной обмоток; $\frac{r_2' \cdot (1-s)}{s}$ — сопротивление, в котором при токе I_2' и неподвижном роторе выделяется мощность $P_{эл} = I_2'^2 \cdot \frac{r_2' \cdot (1-s)}{s}$, равная механической мощности машины $P_{мех} = M\omega$; $R_1 = \dot{c}_1 \cdot r_1$; $R_2 = \dot{c}_1^2 \cdot r_2'$; $X_2 = \dot{c}_1^2 \cdot x_2'$ — приведенные сопротивления обмотки ротора; $\dot{c}_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m} \cong 1,02 \div 1,1$; s — скольжение, $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$; ω_0 — синхронная угловая скорость (скорость вращения магнитного поля), $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$; p — число пар полюсов; f_1 — частота питающей сети; ω — угловая скорость вращения ротора.

Расчеты характеристик АД ведутся, как правило, по схеме, изображенной на рис. 4.3в, поэтому в справочной литературе [23, 24] приводятся параметры R_1, X_1, R_2, X_2 в относительных единицах.

За базовое принимается номинальное сопротивление фазы обмотки статора $Z_H = \frac{U_{1H}}{I_{1H}}$, а относительное значение параметра, например, $r_1^* = \frac{r_1}{Z_H} = \frac{r_1 I_{1H}}{U_{1H}}$. Для асинхронных машин мощностью от нескольких киловатт и выше значения параметров [20]:

$$\begin{aligned} x_m^* &= 2 \div 4; r_m^* = 0,08 \div 0,35; \\ r_1^* &\cong r_2'^* = 0,01 \div 0,07; x_1^* \cong x_2'^* = 0,08 \div 0,2. \end{aligned}$$

Уравнения напряжений для фазы статора и ротора из Т-образной схемы:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + jx_1 \dot{I}_1; \\ \dot{E}'_2 = \dot{E}_1 = \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{I}'_2 r'_2 + \dot{I}'_2 \frac{1-s}{s} r_2 + jx'_2 \dot{I}'_2, \end{cases} \quad (4.2)$$

где $E_1 = 4,44f_1 w_1 \Phi_m k_{061}$ — ЭДС фазы обмотки; $\Phi_m = \frac{2}{\pi} B_\delta \tau l_1$ — магнитный поток на полюс; $B_\delta \leq (0,7 \div 1,0)$ Тл — индукция в зазоре (амплитуда); τ — полюсное деление, $\tau = \frac{\pi D_1}{2p}$; l_1 — активная длина статора; D_1 — внутренний диаметр статора; $2p$ — число полюсов.

Для Г-образной схемы

$$\begin{aligned} I'_2 = c_1 I''_2; \dot{I}_1 = \dot{I}_{00} - \dot{I}''_2; \dot{I}_{00} = \frac{\dot{U}_1}{r_1 + jx_1 + r_m + jx_m}; \\ I''_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

где $r_1, x_1, r_m, x_m, R_1, R_2, X_1, X_2$ — параметры схемы замещения по рис. 4.3б, в.

Подводимая к двигателю электрическая мощность, Вт

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi, \quad (4.4)$$

где $m_1 = 3$ — число фаз; U_1, I_1 — фазные напряжение и ток.

Часть этой мощности расходуется на потери в обмотке статора $\Delta P_{эл1}$, а вращающийся поток вызывает магнитные потери в стали ΔP_{Fe} (см. рис. 4.4):

$$\begin{cases} \Delta P_{эл1} = m_1 I_1^2 r_1; \\ \Delta P_{Fe} = m_1 I_{00}'^2 r_m. \end{cases} \quad (4.5)$$

Электромагнитная мощность, передаваемая вращающимся потоком через зазор на ротор:

$$\begin{cases} P_{эм} = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{Fe} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}; \\ P_{эм} = M \omega_0. \end{cases} \quad (4.6)$$

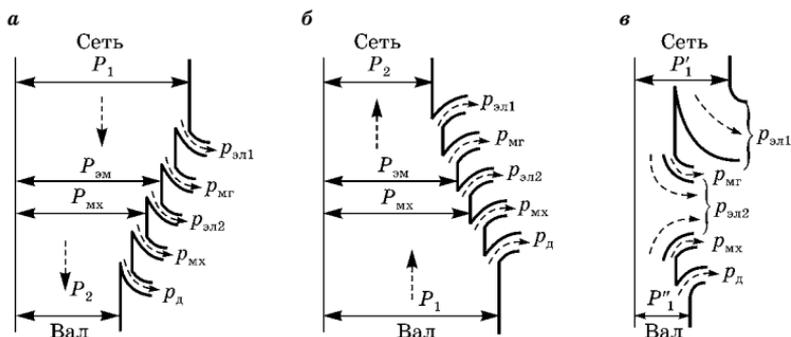


Рис. 4.4

Энергетические диаграммы асинхронной машины при работе в режимах:

a — двигателя; *б* — генератора; *в* — противовключения.

Электрические потери в обмотке ротора

$$\Delta P_{эл2} = m_1 I_2'^2 r_2' = m_2 I_2^2 r_2. \quad (4.7)$$

Полная механическая мощность, развиваемая двигателем

$$P_{мех} = P_{эм} - \Delta P_{эл2} = m_1 I_2'^2 \frac{1-s}{s} r_2' = M\omega. \quad (4.8)$$

Полезная механическая мощность на валу

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_{д} - \Delta P_{мех}, \quad (4.9)$$

где $P_{мех}$, $\Delta P_{д}$ — механическая мощность и добавочные потери соответственно.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P}. \quad (4.10)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{m_1 U_1 I_1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} UI}. \quad (4.11)$$

Из (4.9–4.11) следует, что потери в обмотке ротора

$$\begin{aligned} \Delta P_{эл2} &= M\omega_0 - M\omega = sP_{эм}; \\ P_{мех} &= (1-s)P_{эм}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Следовательно, потери в обмотке ротора пропорциональны величине скольжения и не зависят от причин его изменения. Если пренебречь потерями в обмотке статора и стали, то $P_{эм} \approx P_1$, и тогда для большей физичности и доступности можно записать

$$\Delta P_{эл2} \approx sP_1. \quad (4.13)$$

При соотношении параметров $r_1^* \approx r_2'^*$, $\Delta P_{эл1} \approx \Delta P_{эл2}$.

Именно это соотношение чаще всего приводится в пользу альтернативных асинхронному двигателю машин с точки зрения энергетики.

На рис. 4.4 приведены энергетические диаграммы асинхронной машины в режимах двигателя, генератора при работе на сеть и генератора в тормозном режиме противовключения.

К двигателю подводится электрическая мощность P_1 , а сам процесс преобразования ее в механическую сопровождается потерями: в обмотках $\Delta P_{эл1}$ и $\Delta P_{эл2}$, в стали $P_{мг}$, механическими $\Delta P_{мех}$ и добавочными $\Delta P_{д}$. К генератору подводится механическая мощность P_1 , а ее преобразование в электрическую P_2 происходит с теми же потерями. В режиме противовключения к машине подводятся электрическая P_1' и механическая P_1'' с вала мощности, и обе составляющие преобразуются в потери внутри машины — основные из которых в цепях обмоток статора и ротора $\Delta P_{эл1}$ и $\Delta P_{эл2}$.

4.3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С точки зрения электромеханического преобразования энергии асинхронная машина может работать в трех основных режимах: двигательном, генераторном и тормозном (по сути генератор, но без отдачи энергии в сеть). Двигатель является потребителем электроэнергии, генератор — источником, а тормоз преобразует электрическую и (или механическую) энергию в тепло [16, 18, 26]. С позиций эксплуатации важнейшее значение имеют режимы пуска, торможения и регулирования скорости двигателей.

Механическая характеристика асинхронного двигателя — это зависимость угловой скорости от электромагнитного момента $\omega(M)$ при $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$, или $M(s)$ при тех же условиях. Момент на валу M_2 будет меньше электромагнитного на величину момента холостого хода M_0 , который обычно включают в момент сопротивления нагрузки.

$$\begin{cases} M_{\text{эм}} = M_0 + M_2, \\ M_0 = \frac{\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{д}}}{\omega}, M_2 = \frac{P_2}{\omega}. \end{cases} \quad (4.14)$$

Электромагнитный момент из (4.7), (4.12)

$$M_{\text{эм}} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{s \omega_0} = \frac{m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_0}. \quad (4.15)$$

Подставив в (4.15) значение тока I_2' с учетом $I_2' = c_1 I_2''$, $R_2 = c_1^2 r_2'$ по схеме рис. 4.3б, в, получим

$$\begin{cases} M = \frac{m_1 p U_1^2 R_2}{2\pi f_1 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]} \\ \text{или} \\ M = C_m \Phi_{\delta} I_2' \cos \psi_2 = C_m \Phi_{\delta} I_{2a}, \end{cases} \quad (4.16)$$

где R_1 , R_2 , X_1 , X_2 — приведенные параметры Г-образной схемы замещения; $C_m = \frac{1}{\sqrt{2}} m_1 w_1 p k_{\text{об1}}$ — постоянная величина для конкретной машины; $\Phi_{\delta} = \frac{2}{\pi} B_{\delta} l_1 \tau$ — поток в зазоре на полюс; ψ_2 — угол сдвига между E_2 и I_2 . По форме выражение (4.16) соответствует моменту машины постоянного тока (там ток якоря I_a , здесь — активная составляющая тока ротора). Второе выражение несет четкий физический смысл взаимодействия проводника с током и магнитного поля (закон Ампера) [16, 18].

Видно, что при конкретном скольжении момент пропорционален квадрату напряжения и тем меньше, чем

больше R_1 и индуктивные сопротивления рассеяния X_1 , X_2 . Физически это означает: с ростом r_1 и x_1 увеличивается падение напряжения на них и уменьшается ЭДС E_1 ; с увеличением x_2 возрастает угол ψ_2 между ЭДС E_2 и током I_2 , уменьшается активная составляющая вторичного тока. Отметим, что квадратичная зависимость от напряжения сохраняется только при снижении напряжения от номинального. При повышении напряжения больше чем на 10% от номинального резко возрастает намагничивающий ток из-за насыщения магнитной системы.

Исследование (4.16) на экстремум, т. е. решение уравнения

$$\frac{dM}{ds} = 0,$$

дает значения максимального момента M_m и соответствующего скольжения s_k

$$\begin{cases} M_m = \frac{m_1 p U_1^2}{2\omega_0 [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2}]}; \\ s_k = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}, \end{cases} \quad (4.17)$$

где $X_k = X_1 + X_2$ — индуктивное сопротивление короткого замыкания; знак «+» относится к двигательному режиму работы, а «-» — к генераторному.

Из (4.17) видно, что величина максимального момента не зависит от сопротивления цепи ротора R_2 , а скольжение s_k пропорционально величине R_2 .

В нормальных асинхронных машинах R_1 значительно меньше X_k (как правило, R_1 составляет 10÷15% от X_k [21, 24, 25]). В этом случае

$$s_k \cong \pm \frac{R_2}{X_k} = \frac{R_2}{X_1 + X_2}. \quad (4.18)$$

Отметим еще раз, что $R_1 = c_1 r_1$ здесь — общее активное сопротивление фазы, включая и возможное добавочное сопротивление; $X_1 = c x_1$; $X_2 = c^2 x'_2$; $R_2 = c_1^2 r'_2$ — общее сопротивление фазы ротора (в двигателе с фазным ротором сюда входит и сопротивление $R_{2д}$).

Значения моментов M_m и скольжений s_k приводятся в справочных данных. Для двигателей различного назначения перегрузочная способность

$$k_M = \frac{M_m}{M_H} = (1,8 \div 3,0), s_k \cong 0,05 \div 0,3.$$

Более компактная формула момента через известные M_m, s_k, R_1, R_2 получена из (4.16, 4.17) и носит название формулы Клосса [20, 21]

$$M = \frac{2M_m(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}, \quad (4.19)$$

где $a \cong \frac{R_1}{R_2}$; s — текущее значение скольжения.

В машинах без добавочного сопротивления в цепи ротора $r_1 \approx r_2'$, значит, и $R_1 \approx R_2$. Поэтому (4.19) может быть переписана в виде

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2(1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2s_k}. \quad (4.20)$$

По каталожным данным (M_H, M_m, s_H) можно определить s_k , а затем рассчитать и характеристику $M(s)$ по (4.20).

Если в (4.19) пренебречь слагаемым $2s_k$ в числителе и знаменателе, то получим используемую для приближенных расчетов упрощенную формулу Клосса

$$\frac{M}{M_m} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (4.21)$$

В режиме короткого замыкания, при $s = 1$, двигатель развивает пусковой момент M_H , представляющий важную характеристику для электроприводов

$$M_H = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega_0 \cdot [(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2]}. \quad (4.22)$$

При этом предполагается, что параметры схемы замещения постоянны. Для двигателей различного назначения

$$k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{\text{н}}} = (1,0 \div 2,0) \quad [20, 21, 24].$$

На рис. 4.5–4.7 представлены: механическая и электромеханическая характеристики в относительных единицах $M^*(s)$, $I^*(s)$ короткозамкнутого двигателя мощностью 15 кВт (рис. 4.5); механические характеристики $\omega(M)$ двигателя с фазным ротором (рис. 4.6) и короткозамкнутым (рис. 4.7). На рис. 4.7б приведены значения номинальных скольжений для короткозамкнутых двигателей различной мощности.

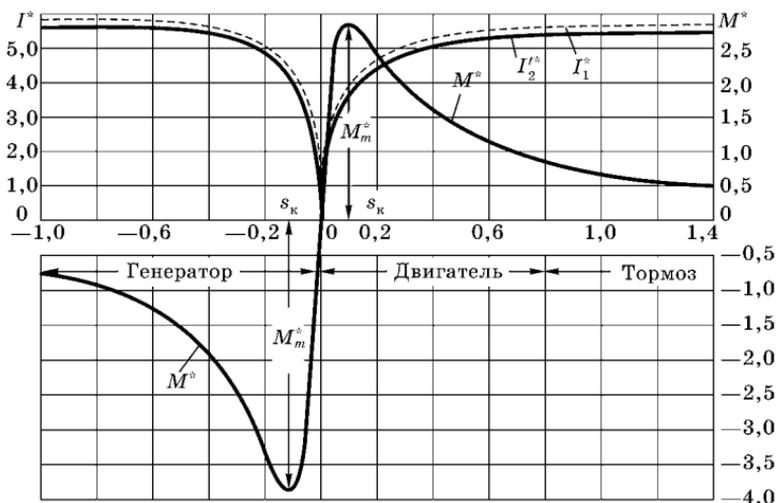


Рис. 4.5
Механическая $M(s)$ и электромеханическая $I(s)$ характеристики АД КЗР

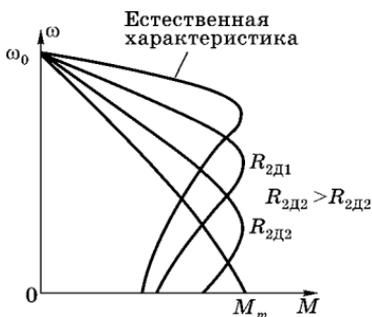


Рис. 4.6
Механические характеристики АД ФР при $R_{2д} = \text{var}$

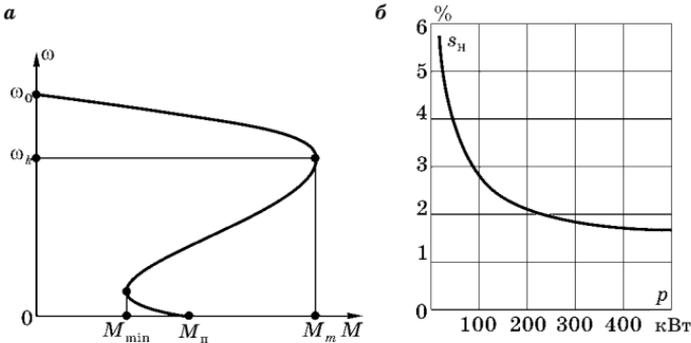


Рис. 4.7
Зависимости $\omega(M)$ (а) и $s_H(P_2)$ (б) АД КЗР

Характерные точки механической характеристики (рис. 4.5–4.7):

1) $s = 0$, $\omega = \omega_0$, $M = 0$, $E_2 = 0$, $I_2 = 0$ — идеального холостого хода;

2) $s = 1$, $\omega = 0$, $M = M_{к.з.} = M_n$ — короткого замыкания, M_n — пусковой момент; $I_1 = I_n = (4,5 \div 7) I_n$ — пусковой ток для АД с короткозамкнутым ротором;

3) $s = s_k$, $M = M_m$, — точка максимальных значений момента M_m и соответствующего скольжения s_k . В режиме генератора: $-M_{mг}$, $-s_{mг}$;

4) $s = s_H$, $M = M_n$, $\omega = \omega_n$ — точка номинального двигательного режима;

5) $\omega = \omega_{min}$, $M = M_{min}$, $s = s_{min}$ — минимального момента. Значение M_{min} приводится в справочниках, $M_{min} \cong (0,8 \div 0,9) \cdot M_n$.

Минимальный момент обусловлен моментами (тормозными) от высших гармоник намагничивающей силы, в основном 7-й гармоники. Скольжение

$$s_{min} \cong 1 - \frac{1}{v} = \frac{6}{7} \cong 0,857.$$

Значение скольжения однозначно определяет и энергетический режим работы АД [20, 21]:

1. $0 < s < 1$, $0 < \omega < \omega_0$, $M > 0$ — двигательный режим.
2. $-\infty < s < 0$, $\omega_0 < \omega < \infty$, $M < 0$ — генераторный режим с отдачей энергии в сеть.

3. $s > 1$, $\omega < 0$, $M < 0$ — генераторный (тормозной) режим или противовключения, когда ротор и магнитное поле вращаются в противоположных направлениях. В Приложении приведены основные технические характеристики короткозамкнутых асинхронных двигателей: отечественных, серии АИР (табл. п.12–15); фирмы SEW EURO-DRIVE серии DRS (стандарт) и DRP (энергосберегающие PREMIUM, табл. п.31–32). Выпускаются еще машины серии DRE (энергоэффективные) с близкими к DRP характеристиками. Повышение КПД (при снижении скольжения) достигнуто за счет снижения плотностей тока в обмотках и индукций в стали, что привело к некоторому увеличению габаритов и массы. В некоторых случаях короткозамкнутая клетка выполняется медной (буква «С» в типе), например DRP225MC4.

Пример. Для асинхронного двигателя с фазным ротором 4АНК 315510У3: а) построить естественную механическую характеристику; б) рассчитать сопротивление $R_{2д}$ добавочного резистора, при включении которого в цепь ротора момент при пуске будет равен максимальному; в) определить сопротивление $R_{2д}$, при котором реостатная (искусственная) характеристика пройдет через точку $s = 0,2$ при $M = M_H$.

Паспортные данные двигателя: $P_H = 75$ кВт, $n_H = 573$ об/мин; $U_{1H} = 380$ В, $E_{2H} = 217$ В (при неподвижном и разомкнутом роторе); $\cos \varphi = 0,8$, $\lambda = \frac{M_m}{M_H} = M_m^* = 1,8$, $I_{2H} = 221$ А, $s_H = 0,045$, $s_K = 0,158$.

Относительные сопротивления Г-образной схемы замещения: $R_1 = 0,036$; $R_2 = 0,052$; $X_1 = 0,14$; $X_2 = 0,19$; $X_\mu = 3,5$.

Решение. I. Построение механической характеристики:

1) коэффициент трансформации

$$k_u = \frac{U_1}{E_{2k}} = \frac{380}{217} = 1,75;$$

2) коэффициент трансформации токов

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{221}{158} = 1,4;$$

3) коэффициент приведения

$$k = k_u \cdot k_i = 1,75 \cdot 1,4 = 2,45;$$

4) номинальный ток обмотки статора

$$I_{1н} = \frac{P_{2н}}{\sqrt{3}U_n \eta \cos \varphi} = \frac{75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 158 \text{ А};$$

5) номинальное сопротивление двигателя

$$Z_n = \frac{U_{1ф}}{I_{1н}} = \frac{220}{158} = 1,392 \text{ Ом};$$

6) коэффициент

$$c_1 \cong 1 + \frac{x_1}{x_\mu} = 1 + \frac{0,14}{3,5} = 1,04;$$

7) сопротивления, Ом

$$R_1 = R_1^* \cdot Z_n = 0,036 \cdot 1,392 = 0,052,$$

$$X_1 = X_1^* \cdot Z_n = 0,14 \cdot 1,392 = 0,195,$$

$$X_2 = X_2^* \cdot Z_n = 0,19 \cdot 1,392 = 0,264,$$

$$R_2 = R_2^* \cdot Z_n = 0,052 \cdot 1,392 = 0,072,$$

$$X_\mu = 4,87, X_\kappa = 0,459;$$

8) критическое скольжение s_κ (или s_m)

$$s_\kappa = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_\kappa^2}} = \frac{0,052}{\sqrt{0,036^2 + 0,33^2}} = 0,157.$$

(по каталогу $s_\kappa = 0,158$);

9) при $R_{2\Sigma} = \sqrt{R_1^2 + X_\kappa^2}$ скольжение $s_\kappa = 1$. Следовательно, приведенное $R'_{2\Sigma} = 0,332$. Добавочное сопротивление $R'_{2д} = R_{2\Sigma} - R_2 = 0,332 - 0,072 = 0,26$ Ом.

Реальное сопротивление $R_{2д}$ (неприведенное).

$$R_{2д} = \frac{R'_{2д}}{k \cdot c_1^2} = 0,098 \text{ Ом} \text{ — ответ на вопрос б) в условии}$$

примера.

$$\text{Проверка: } \frac{R_2}{R_{2\Sigma}} = \frac{s_m}{1} = \frac{0,052}{0,0332} = \frac{0,157}{1} = 0,157;$$

10) максимальный момент через параметры

$$M_m = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 62,8 \cdot (0,052 + \sqrt{0,052^2 + 0,459^2})} = 2271 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

(по каталогу $M_m = 2251 \text{ Н} \cdot \text{м}$).

В режиме генератора

$$M_m = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 62,8 \cdot (0,052 - \sqrt{0,052^2 + 0,459^2})} = -2759 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

11) уравнение естественной механической характеристики (формула Клосса)

$$M = \frac{2M_m(1 + as_m)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2as_m} = \frac{2 \cdot 2271 \cdot (1 + 0,109)}{\frac{s}{0,157} + \frac{0,157}{s} + 2 \cdot 0,109}$$

Задаем значениями скольжения и находим величину момента (табл. 4.1):

Таблица 4.1

Механическая характеристика $M(s)$

s	0	0,045	0,09	0,12	0,157	0,30	0,6	1,0
M	0	1250	1986	2198	2271	1890	985	746

II. Расчет сопротивления $R_{2д}$ см. п. 9), т. е. $R_{2д} = 0,098 \text{ Ом}$.

III. Отношение сопротивлений роторной цепи при номинальном моменте

$$\frac{s_e}{s_u} = \frac{R'_2}{R'_{2\Sigma}}; \frac{0,045}{0,20} = \frac{0,072}{R'_{2\Sigma}}; R'_{2\Sigma} = 0,32 \text{ Ом}.$$

Величина добавочного сопротивления

$$R'_{2д} = R'_{2\Sigma} - R'_2 = 0,32 - 0,072 = 0,248 \text{ Ом}.$$

$$R_{2д} = \frac{R'_{2д}}{kc_1^2} = \frac{0,248}{2,45 \cdot 1,08} = 0,094 \text{ Ом}.$$

4.4. ПУСК И ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Основными показателями пуска электродвигателей, в том числе и асинхронных, являются: а) величина пускового момента; б) пусковой ток; в) время пуска и потери энергии.

Очевидным является условие, чтобы пусковой момент был больше момента сопротивления. Разница $M - M_c = M_d > 0$ определяет динамический момент, ускорение и время пуска t_n . Кроме того, время пуска зависит от момента инерции вращающихся масс. В некоторых приводах механизмов (шаровые мельницы, компрессоры, грузоподъемные механизмы) пусковой момент двигателя должен быть больше номинального. С другой стороны, величина пускового тока для данной сети (источник плюс сеть) не должна превышать определенной величины во избежание чрезмерного снижения напряжения на зажимах двигателя ($M \equiv U^2$).

Пуск в ход двигателей с фазным ротором (АДФР) происходит включением в цепь ротора добавочного активного сопротивления $R_{2д}$ (рис. 4.8). Части пускового реостата шунтируются по мере разгона с помощью контакторов (рис. 4.8а). Процесс пуска, т. е. переход на различные искусственные характеристики, происходит ступенчато (рис. 4.8б) до перехода на естественную характеристику (точка 1). Сопротивление ступеней легко определяется графически, памятуя, что отрезок ab при M_n пропорционален сопротивлению фазы обмотки ротора r_2 . Для повышения плавности необходимо увеличивать количество ступеней реостата или использовать импульсное регулирование (рис. 4.8в) с моментом M' по штриховой линии (рис. 4.8б).

На рис. 4.9 представлены схема включения АДФР в режиме динамического торможения и характеристики двигателя в трех квадрантах: I — двигательный режим, характеристики отличаются величиной $R_{2д}$; II — режим рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть, когда $\omega > \omega_0$; режим динамического торможения при питании обмоток статора постоянным током через резистор R по одной из указанных в табл. 4.1 схем. При этом харак-

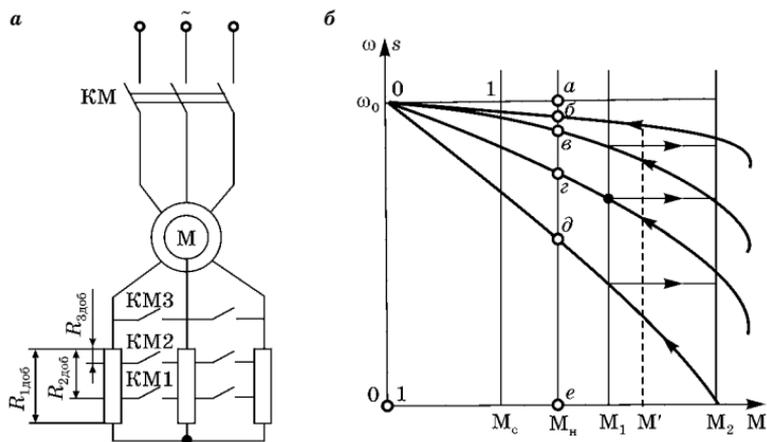


Рис. 4.8

Схема включения пусковых резисторов (а, в) и реостатные механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором (б)

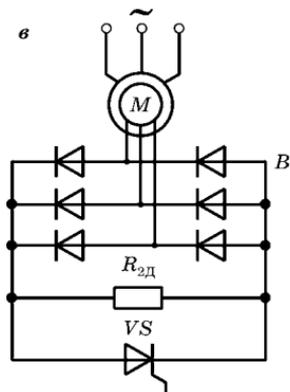
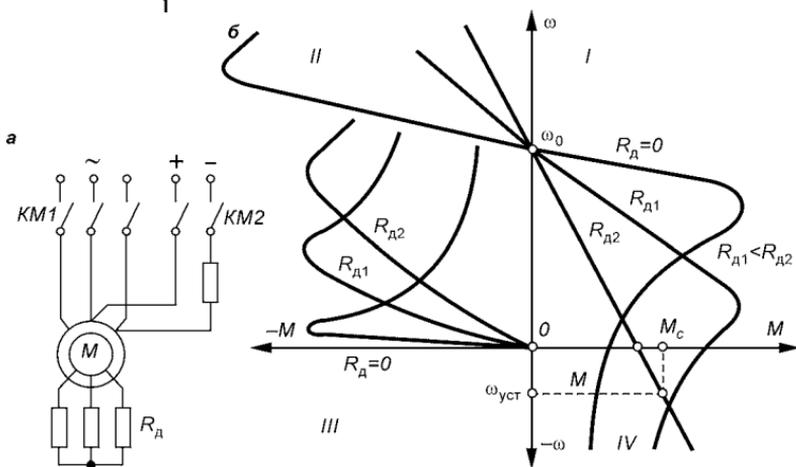


Рис. 4.9

Схема включения АДФР (а) и механические характеристики АДФР (б) в различных режимах



а

б

теристики зависят от величины тока (расчет по табл. 4.1) и сопротивления R_d в цепи ротора.

Торможение противовключением осуществляется изменением направления вращения поля при соответствующем выборе резистора R_d . Для обеспечения постоянного замедления, например для транспортных средств, необходимо иметь постоянство тормозного момента. Это достигается уменьшением сопротивления со снижением скорости, вплоть до $R_d = 0$.

Пуск в ход короткозамкнутых двигателей. Для нерегулируемых электроприводов при достаточной мощности электрических систем пуск осуществляется прямым включением в сеть (рис. 4.10а, б) с помощью магнитного пускателя. При этом номинальный ток тепловых реле

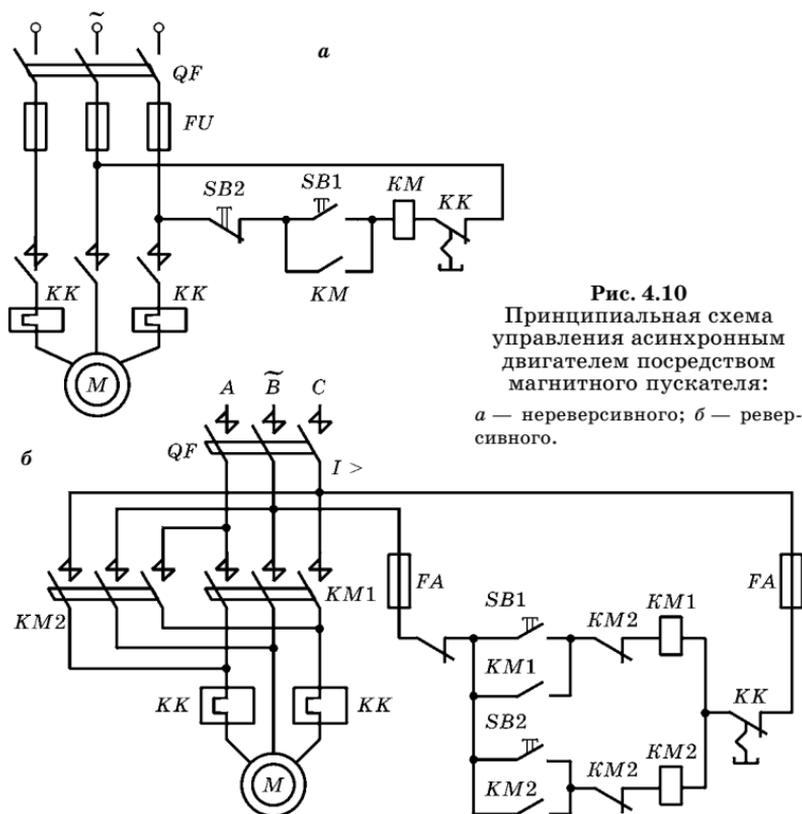


Рис. 4.10

Принципиальная схема управления асинхронным двигателем посредством магнитного пускателя:

а — нереверсивного; б — реверсивного.

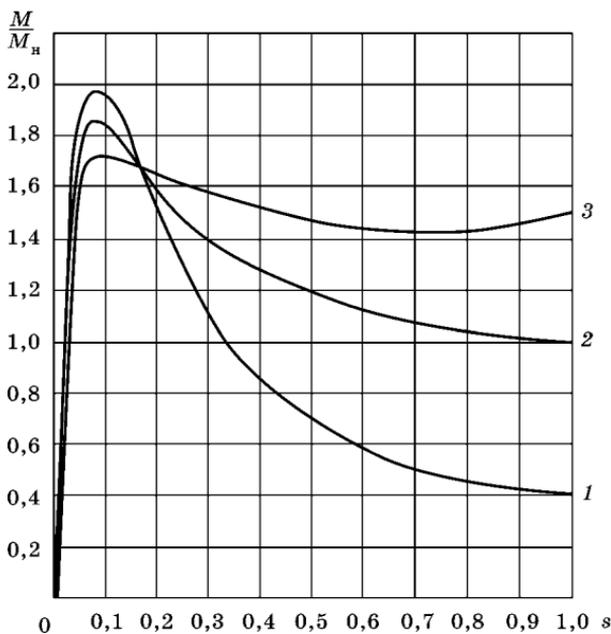


Рис. 4.11

Примерные механические характеристики асинхронных короткозамкнутых двигателей:

1 — нормального исполнения; 2 — широкопазного исполнения; 3 — двухклеточного исполнения.

(ток уставки) $I_{\text{ут}} = (1,2 \div 1,4)I_{\text{н}}$. Максимальная токовая защита не должна срабатывать при пуске двигателя, поэтому $I_{\text{ум}} = kI_{\text{н}}$; $k = 1,2 \div 1,5$; $I_{\text{п}} = (4,5 \div 7)I_{\text{н}}$ — пусковой ток при прямом включении. При этом $M_{\text{п}} = (1,1 \div 1,5)M_{\text{н}}$ для машин нормального исполнения. Двигатели специального исполнения (широкопазные, двухклеточные) имеют большие пусковые моменты при меньших токах (рис. 4.11), что достигается за счет эффекта вытеснения тока при высоких скольжениях. Соотношение между моментами при пуске и работе двигателя показано на рис. 4.12. При незначительных моментах трогания механизма (насосы, вентиляторы) и в электросистемах сравнимой мощности для ограничения пусковых токов проводят пуск при пониженных напряжениях, повышая его по мере разгона. На рис. 4.13 приведены схемы пуска с использованием

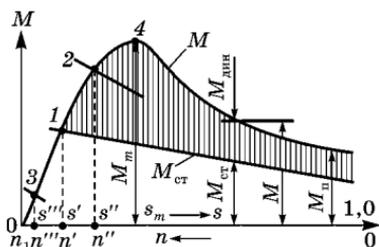


Рис. 4.12
Соотношения между моментами при пуске и работе асинхронного двигателя

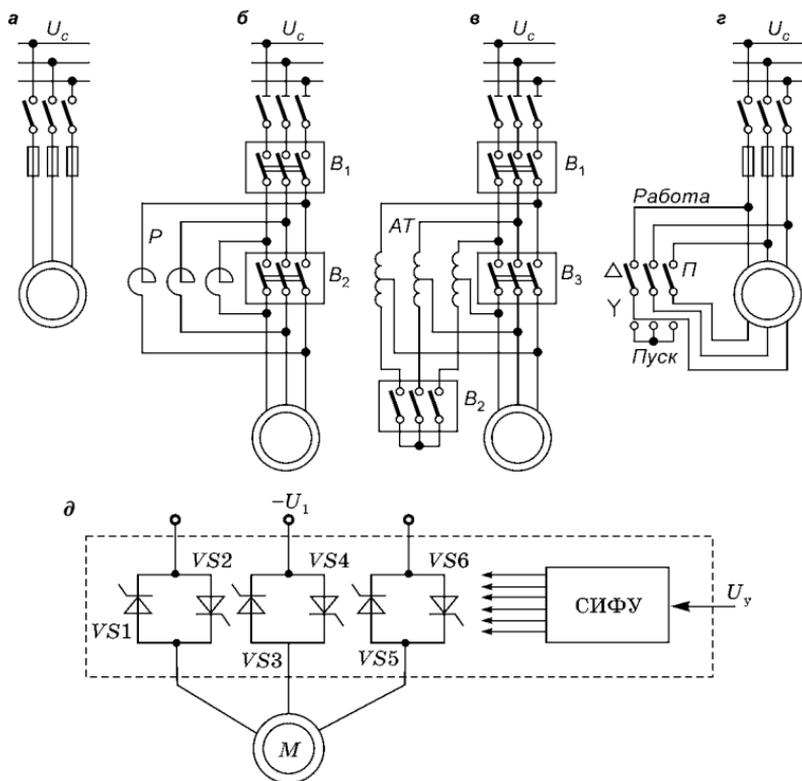


Рис. 4.13

Схемы пуска короткозамкнутых асинхронных двигателей:

а — прямой; *б* — реакторный; *в* — автотрансформаторный; *г* — с переключением со звезды на треугольник; *д* — через тиристорный регулятор напряжения.

реакторов (индуктивностей), автотрансформаторов, переключения со звезды на треугольник, устройств плавного пуска. Достаточной для прямого пуска считается мощность электрической системы, в 7÷10 раз превосходящую

мощность двигателя. Оценивая приведенные схемы, можно отметить следующее:

1. Реакторный и автотрансформаторный пуски требуют дорогостоящего оборудования. Кроме того, при реакторном пуске индуктивность должна быть регулируемой.

2. Пуск переключением обмоток двигателя со звезды на треугольник часто используется на практике для двигателей средней и большей мощности, когда номинальный режим работы по схеме треугольника, а обмотка имеет все шесть выводов. При этом пусковой ток при $U = U_n$ снижается в $\sqrt{3}$ раз, а момент — в 3 раза. Очевидно, что применение способа ограничено приводами с соответствующей механической характеристикой механизма.

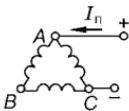
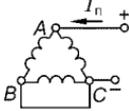
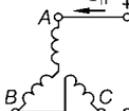
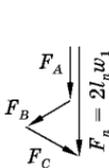
3. Устройства плавного пуска (УПП) выполняются по схеме тиристорного регулятора напряжения (ТРН) (рис. 4.13*д*). Система импульсно-фазового управления (СИФУ) позволяет задавать начальное значение напряжения и темп его нарастания при пуске. По достижении номинальной частоты вращения УПП может быть шунтировано контакторами или использоваться в качестве регулятора напряжения. Такие устройства выпускаются промышленностью на токи в тысячи ампер при напряжениях в тысячи вольт. Применяются в приводах транспортеров с зубчатыми и цепными передачами, в грузоподъемных механизмах для снижения динамических нагрузок (выборки зазоров, натяжения лент, канатов, цепей).

В приводах по системе «преобразователь частоты — АД» пуск осуществляется регулированием частоты при номинальном или несколько большем моменте и токах до $1,5I_n$.

Из указанных способов пуска в настоящее время наиболее распространенными являются: прямой пуск при соблюдении указанных выше условий; переключение со звезды на треугольник; использование УПП. В приводах с особо тяжелыми условиями пуска — асинхронные двигатели с фазным ротором или с использованием преобразователей частоты.

Таблица 4.2

обмоток АД в режиме динамического торможения

	3	4	5
			
	 $F_A = F_C = \frac{1}{3} l_n w_1$ $F_C = \frac{2}{3} l_n w_1$	 $F_A = F_C = \frac{1}{2} l_n w_1$	 $F_A = F_B = F_C = I$
	$\frac{3}{2} r_1$	$\frac{r_1}{2}$	$3r_1$
	$\frac{\sqrt{2}}{3} l_n$	$\frac{1}{\sqrt{2} - \sqrt{3}} l_n$	$\frac{2\sqrt{2}}{3} l_n$

Тормозные режимы приводов с короткозамкнутыми двигателями те же самые, что и АДФР: рекуперативное торможение, динамическое и противовключение. Разница состоит в том, что в короткозамкнутых двигателях потери при динамическом торможении и противовключении выделяются непосредственно в обмотках, поэтому существует жесткое ограничение по их тепловому состоянию. С целью сохранения работоспособности машины приходится ограничивать время работы в таких режимах, понижать напряжение. На рис. 4.14 приведена схема управления пуском и динамическим торможением АД с короткозамкнутым ротором. Питание обмоток статора постоянным током в режиме торможения осуществляется от сети через выпрямитель и резистор R_r (регулируемый).

Расчетные соотношения для разных схем соединения обмоток АД в режиме динамического торможения приведены в табл. 4.2.

4.5. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором при работе от сети $U = \text{const}$, $f = \text{const}$ является двигателем практически постоянной скорости, поэтому в большинстве нерегулируемых приводов мощностью до 200–400 кВт используются именно такие двигатели.

Начиная с 80-х гг. XX в. в связи с массовым выпуском полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов-транзисторов (iGBT, MOSFET и др.) [12, 38, 39] и на их базе преобразователей частоты (ПЧ) асинхронный привод по схеме ПЧ–АД стал наиболее используемым регулируемым электроприводом.

Скорость асинхронного двигателя

$$\omega = (1 - s)\omega_0 = \omega_0 - s\omega_0 = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (4.23)$$

где $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$ — синхронная скорость; $\Delta\omega$ — изменение (падение) скорости вследствие действия нагрузки. Величина $\Delta\omega$ определяет жесткость механической характеристики

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta\omega}.$$

Из (4.23) видно, что путей регулирования скорости всего два: 1) $\omega_0 = \text{var}$; 2) $\Delta\omega = \text{var}$ при $\omega_0 = \text{const}$, что означает изменение скольжения или жесткости характеристики $\omega(M)$.

Сразу отметим, что электрические потери в цепи ротора $\Delta P_{\text{эл2}} = sP_{\text{эм}} = M\Delta\omega \approx sP_1$ (см. 4.2), при прочих равных условиях пропорциональны величине скольжения, поэтому способы регулирования скорости изменением жесткости характеристики $\omega(M)$ по определению являются неэкономичными с точки зрения потерь энергии.

4.5.1. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЕМ ЖЕСТКОСТИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Изменение величины $\Delta\omega$, т. е. переход на искусственные характеристики, может быть достигнут регулированием приложенного напряжения $U_1 = \text{var}$ при $f_1 = \text{const}$ и введением добавочного активного сопротивления $R_{2\text{д}}$ в цепь ротора (только фазного).

Фазный ротор обеспечивает дополнительный канал управления, и в этом его преимущество перед короткозамкнутым. Искусственные реостатные характеристики (см. рис. 4.9б) получают включением регулируемого сопротивления в цепь ротора (рис. 4.9а).

В зависимости от способа регулирования величины сопротивления — ступенчато или плавно — зависит и плавность регулирования скорости, а сам процесс осуществляется вниз от основной скорости (однозонное регулирование).

Диапазон регулирования

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = (1,5 \div 2)$$

ограничен уменьшением жесткости характеристик $\omega(M)$, следовательно, и снижением стабильности регулирования (или точности), определяемой как изменение скорости $\Delta\omega$ при изменении момента на валу.

При одном и том же моменте АД для естественной и искусственной характеристик справедливы соотношения [10, 20, 24]

$$\frac{s_{\text{ин}}}{s_{\text{е}}} = \frac{s_{\text{н}}}{s_{\text{е}}} = \frac{r_2 + R_{2\text{д}}}{r_2}; \quad \frac{R_{2\text{д}}}{r_2} = \frac{s_{\text{н}}}{s_{\text{е}}} - 1, \quad (4.24)$$

где $s_{\text{н}}$, $s_{\text{е}}$ — текущие значения скольжения для искусственной и естественной характеристик.

По (4.24) можно рассчитать величину добавочного сопротивления $R_{2\text{д}}$ для получения нужных искусственных характеристик.

При увеличении скольжения возрастают потери в цепи ротора, $\Delta P_{\text{эл2}} \cong sP_1$. Например, при снижении скорости в два раза потери во вторичной цепи составляют $\approx 50\%$ от потребляемой мощности, не считая потерь в статоре.

Следовательно, по всем основным показателям и, главное, по потерям энергии этот способ регулирования является неэффективным. Однако из-за простоты реализации он применяется в приводах небольшой мощности.

Регулирование напряжения вниз от номинального можно осуществить: использованием автотрансформатора; включением двигателя через тиристорный регулятор напряжения (ТРН) (см. рис. 4.13).

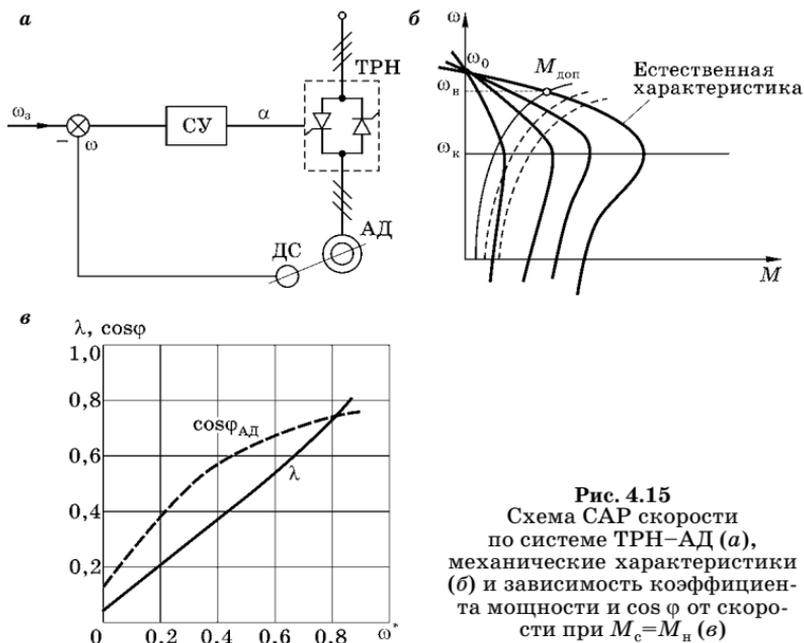


Рис. 4.15
 Схема САР скорости по системе ТРН-АД (а), механические характеристики АД при $U = var$. При этом максимальный момент при пониженном напряжении уменьшается пропорционально квадрату напряжения

На практике применяются тиристорные регуляторы напряжения, когда, управляя углом включения тиристорных регуляторов, можно плавно изменять действующее значение напряжения. На рис. 4.15 приведена схема замкнутой системы автоматического регулирования (САР) скорости ТРН-АД и механические характеристики АД при $U = var$. При этом максимальный момент при пониженном напряжении уменьшается пропорционально квадрату напряжения

$$M_{ми} = M_m \cdot \left(\frac{U}{U_H} \right)^2, \quad (4.25)$$

где $M_{ми}$ — максимальный момент при пониженном напряжении U ; M_m — при номинальном напряжении U_H .

Критическое скольжение s_m при этом остается неизменным, а регулирование скорости происходит за счет уменьшения жесткости (увеличения скольжения). Изменение скорости осуществляется бесступенчато. Из приведенных на рис. 4.15б характеристик видно, что пределы

регулирования весьма ограничены даже при вентиляторном характере нагрузки, когда момент сопротивления $M_c \equiv \omega^2$. Допустимый момент $M_{\text{доп}}$ ограничен и потерями в цепи ротора $\Delta P_{\text{эл2}} \cong s \cdot P_1$, следовательно, с ростом диапазона регулирования КПД привода снижается.

В тепловом отношении необходимо, чтобы потери в роторе на искусственных характеристиках не превышали потери в номинальном режиме, с учетом ухудшения теплоотдачи при понижении скорости, т. е.

$$\Delta P_{\text{эл2}} \leq \Delta P_{\text{эл2н}}. \quad (4.26)$$

Следует отметить, что с ростом угла управления снижается коэффициент мощности системы ТРН–АД, увеличивается потребляемая реактивная мощность, растут потери от высших гармонических тока и напряжения.

Допустимый по нагреву момент двигателя при продолжительном режиме работы будет [10]

$$M_{\text{доп}}^* = \frac{M_{\text{доп}}}{M_n} \leq \frac{s_n}{k_{\text{п2}}^2 \cdot s}, \quad (4.27)$$

где s — рабочее скольжение; $k_{\text{п2}}$ — коэффициент увеличения потерь в цепи ротора от высших гармонических, $k_{\text{п2}} \approx 1,1$.

В табл. 4.2 приведены значения $M_{\text{доп}}^*$ в зависимости от скольжения (или ω/ω_n) [10].

Из (4.27), рис. 4.15б и табл. 4.3 следует, что регулирование скорости АД в системе ТРН–АД при $M_c = \text{const}$ невозможно из-за резкого снижения максимального момента и роста потерь.

На практике такие приводы используются для регулирования скорости в небольших пределах маломощных вентиляторов в системах обеспечения микроклимата птицеферм, хранилищ.

Таблица 4.3

Зависимость $M_{\text{доп}}^*$ от s и ω/ω_n

ω/ω_n	1	0,937	0,833	0,625	0,416	0,208
s	0,04	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80
$M_{\text{доп}}^*$	1	0,36	0,182	0,091	0,06	0,045

4.6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ

Из выражения для угловой скорости асинхронного двигателя

$$\omega = \omega_0(1 - s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1 - s)$$

следует, что синхронную скорость АД можно регулировать изменением числа пар полюсов при заданной частоте f_1 и незначительно изменяющемся скольжении s . Такое регулирование является ступенчатым, так как число пар полюсов может быть только целым. Реализуется такой способ в АД с короткозамкнутым ротором, когда при изменении числа полюсов статора короткозамкнутая обмотка автоматически приспособливается к любому числу. Изменение числа пар полюсов достигается:

- 1) переключением числа пар полюсов одной обмотки, уложенной на статоре;
- 2) выполнением на статоре двух независимых обмоток;
- 3) выполнением двух независимых обмоток, каждая из которых с переключением полюсов (или одна из двух).

Минимальная синхронная частота вращения выпускаемых многоскоростных двигателей равна 500 об/мин, а максимальная — 3000 об/мин при $2p = 2$. Диапазон регулирования скорости не превышает 6:1 (3000:500 об/мин). Направление регулирования (вверх или вниз от основной скорости) зависит от того, при каком числе полюсов скорость АД принята номинальной.

Регулирование (теоретически) возможно при $M = \text{const}$ и при $P = \text{const}$ (рис. 4.16б, в). Реально получить такие характеристики трудно, можно говорить о некотором приближении к ним. Например, двигатель 4A160S4/2УЗ является двухскоростным ($n_1 = 1500$ и 3000 об/мин), мощности $P_2 = 11$ и 14 кВт соответственно, т. е. ближе к $P = \text{const}$. Двигатель 4A200L12/8/6/4УЗ — четырехскоростной (500, 750, 1000 и 1500 об/мин), соответствующие мощности $P_2 = 6; 10; 10; 10,5; 15$ кВт, ближе к $M = \text{const}$.

На рис. 4.16 приведены схема управления (релейно-контакторная) двухскоростным асинхронным двигателем

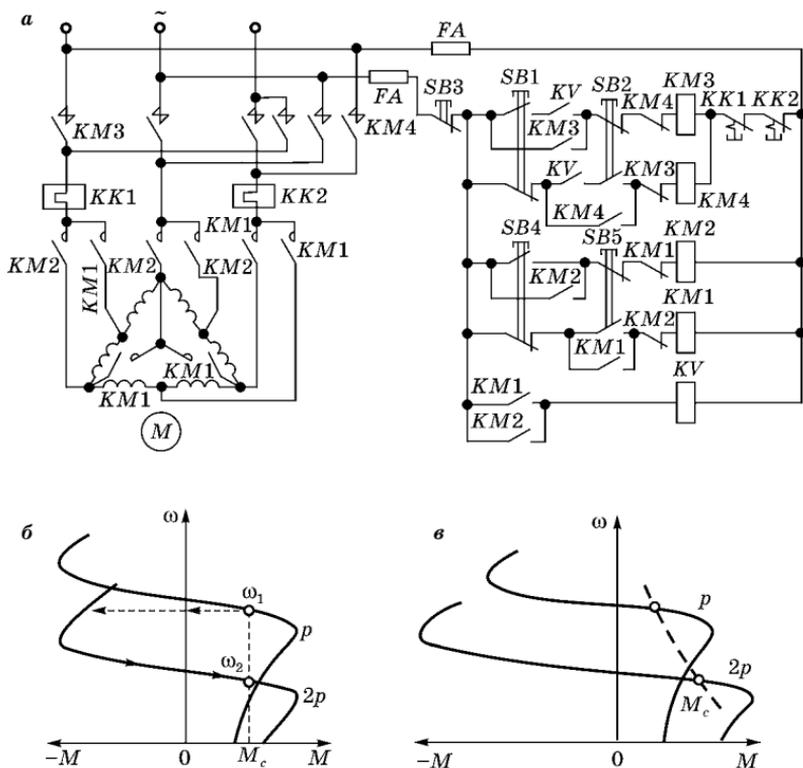


Рис. 4.16

Управление двухскоростным двигателем:

а — схема; б — при $M = \text{const}$; в — при $P_2 = \text{const}$.

(а) и механические характеристики (б, в). Такой способ регулирования экономичен, характеристики имеют высокую жесткость. Однако машина усложняется конструктивно, использование активных материалов неодинаково на разных скоростях (по индукции в зазоре $B\delta$ и линейной токовой нагрузке A).

Двигатели с переключением полюсов находят достаточно широкое применение там, где не требуется плавного регулирования скорости: некоторые металлорежущие станки, вентиляторы, насосы, цементная и нефтегазовая, пищевая и перерабатывающая отрасли, сельскохозяйственная техника.

4.7. ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Частотный способ регулирования скорости обладает теми же преимуществами, что и регулирование двигателей постоянного тока изменением подведенного к обмотке якоря напряжения. Это касается, в первую очередь, экономичности, диапазона регулирования, плавности и точности при высокой жесткости искусственных механических характеристик. Одновременно с регулированием решается и проблема пуска в приводах с большими моментами инерции, работающих в повторно-кратковременных режимах. Возможность регулирования скорости АД изменением частоты вытекает из выражения синхронной скорости $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$.

Уравнения равновесия напряжений при $U = \text{var}$, $f_1 = \text{var}$ [10, 11, 20]

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1, \\ \gamma \dot{U}_{1\text{H}} &= 4,44 f_{1\text{H}} \alpha \dot{\Phi}_\delta w_1 k_{\text{об1}} + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1 \alpha), \end{aligned} \quad (4.28)$$

где $\alpha = \frac{f_1}{f_{1\text{H}}}$ — относительная частота; $\gamma = \frac{U_1}{U_{1\text{H}}}$ — относительное значение напряжения.

Значение магнитного потока из (4.28)

$$\dot{\Phi}_\delta = \frac{1}{k_1 f_{1\text{H}}} \left[\frac{\gamma \dot{U}_{1\text{H}}}{\alpha} - jx_1 \dot{I}_1 - \frac{r_1}{\alpha} \dot{I}_1 \right], \quad (4.29)$$

где $k_1 = \frac{1}{4,44 w_1 k_{\text{об1}}}$.

Из (4.29) видно, что магнитный поток определяется отношением U/f и нагрузкой (током I_1). При этом величина $x_1 I_1$ от частоты не зависит, а влияние падения напряжения на активном сопротивлении (член $\frac{r_1}{\alpha} I_1$) усиливается с уменьшением частоты и при $\alpha \rightarrow 0$, величина $\frac{r_1}{\alpha} I_1 \rightarrow \infty$.

Момент асинхронного двигателя [20, 21]

$$M = C_m \Phi_\delta I_2 \cos \psi_2, \quad (4.30)$$

где $C_m = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_1 \omega_1 k_{o61}$; I_2 — ток обмотки ротора, $I_2 \equiv \Phi \delta$ через ЭДС $E_2 = 4,44 w_2 \Phi \delta k_{o62}$; ψ_2 — угол сдвига между ЭДС E_2 и током I_2 .

Момент двигателя при неизменных параметрах определяется потоком в зазоре. Следовательно, для поддержания, например, постоянства момента необходимо иметь $\Phi \delta = \text{const}$, $I_2 = \text{const}$, $\cos \psi_2 = \text{const}$. Такие соотношения могут быть получены только при $\Phi \delta = \text{const}$ и $f_2 = \text{const}$ или, вводя параметр абсолютного скольжения, $\beta = \frac{f_2}{f_{1H}} = \text{const}$. Очевидно, что при изменении потока $\Phi \delta$ и $M = \text{const}$ изменится ток I_2 , скольжение β , $\cos \psi_2$. Подтверждением сказанного служит регулирование скорости АД в системе ТРН–АД (см. рис. 4.20), когда при $f_1 = \text{const}$ снижение напряжения означает уменьшение магнитного потока.

В 1925 г. М. П. Костенко сформулировал основной закон регулирования [19], который записывается следующим образом:

$$\frac{U_i}{U_k} = \frac{f_i}{f_k} \sqrt{\frac{M_{ci}}{M_{ck}}}, \quad (4.31)$$

где M_{ci} , M_{ck} , — моменты нагрузки при скоростях двигателя, соответствующих частотам f_i , f_k при фазных напряжениях U_i , U_k .

Соотношение (4.31) получено при допущении $r_1 = 0$ и постоянстве перегрузочной способности двигателя. В этом случае поток в зазоре определяется только отношением U/f , т. е. не учитывается влияние нагрузки (слагаемое $x_1 I_1$ и падение напряжения $I_1 r_1$). Из (4.31) получены частные законы изменения U/f при различных механических характеристиках производственных механизмов.

При постоянном моменте нагрузки $M_c = \text{const}$

$$\frac{U}{f} = \text{const}. \quad (4.32)$$

Для вентиляторного характера нагрузки $M_c = \omega^2$.

$$\frac{U}{f^2} = \text{const}. \quad (4.33)$$

Здесь следует отметить, что зависимость (4.33) относится к вентилятору (насосу), работающему при постоянном

аэродинамическом (гидравлическом) сопротивлении. При этом напор пропорционален второй степени скорости, а расход — первой степени, мощность — третьей степени скорости, $P \equiv \omega^3$. Многие приводы насосов работают по замкнутой схеме со стабилизацией напора при переменном расходе. В этом случае $M = \text{const}$ и закон регулирования ближе к (4.32), т. е. $\frac{U}{f} = \text{const}$.

При моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости

$$\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}. \quad (4.34)$$

В табл. 4.4 приведены правила частотного регулирования по (4.31) для различных типов нагрузки [9].

Важно отметить, что допущение $r_1 = 0$ мало сказывается при высоких частотах, близких к номинальным, но при низких частотах резко снижается значение максимального момента (рис. 4.17а) [3, 19].

Причина этого заключается в уменьшении магнитного потока при $U_1/f_1 = \text{const}$ из-за влияния слагаемого $\frac{r_1}{\alpha} I_1$. Для поддержания $M_m = \text{const}$ при понижении частоты напряжение следует снижать в меньшей мере, чем по соотношению (4.31) (рис. 4.17б) (зависимость U').

Современные преобразователи частоты (ПЧ), оборудованные микропроцессорами [38, 39], выполняются с учетом этого влияния, т. е. с $I \times R$ -компенсацией. На рис. 4.17в представлены характеристики $M(f)$, $P(f)$ асинхронного

Таблица 4.4

Правила частотного регулирования

Параметры	$\frac{M}{M_n}$	$\frac{U}{U_n}$	$\frac{P}{P_n}$	$\frac{\Phi}{\Phi_n}$	$\frac{I}{I_n}$
Постоянная мощность	$\frac{f}{f_n}$	$\sqrt{\frac{f_n}{f}}$	const	$\sqrt{\frac{f_n}{f}}$	$\sqrt{\frac{f_n}{f}}$
Постоянный момент	const	$\frac{f}{f_n}$	$\frac{f}{f_n}$	const	const
Вентиляторный закон	$\left(\frac{f}{f_n}\right)^2$	$\left(\frac{f}{f_n}\right)^2$	$\left(\frac{f}{f_n}\right)^3$	$\frac{f}{f_n}$	$\frac{f}{f_n}$

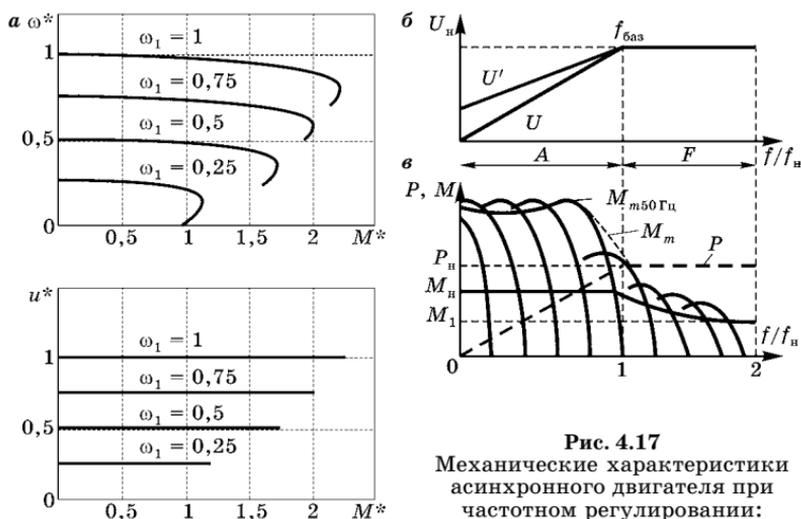


Рис. 4.17
Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании:

a — $U/f = \text{const}$; *б, в* — при $U/f = \text{const}$ с $I \times R$ -компенсацией.

двигателя при пропорциональном управлении и $I \times R$ -компенсации. При частотах от 0 до f_n скорость, напряжение и мощность изменяются по линейному закону при $M = \text{const}$, а при $f > f_n$ напряжение $U = \text{const}$, т. е. реализуется режим ослабленного поля. На этом участке максимальный момент пропорционален $1/f$, $\Phi < \Phi_n$.

Частотное управление асинхронными двигателями нашло широкое применение в приводах с изменяющейся нагрузкой — насосы и вентиляторы с переменным расходом, транспортеры, грузоподъемные механизмы и лифты, бесступенчатые коробки передач в металлорежущих станках, в технологических линиях пищевой и перерабатывающей промышленности и др. Такой привод является мощным энерго- и ресурсосберегающим средством. На рис. 4.18*a* представлена схема насосного агрегата при стабилизации давления (напора) и переменном расходе. Информация о величине напора поступает с датчика давления (обратная связь), а преобразователь частоты выдает соответствующие напряжение и частоту. На рис. 4.18*б* показаны характеристики насоса при различных скоростях $\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$ (кривые 1', 2', 3') и сопротивлениях системы (кривые 1, 2, 3).

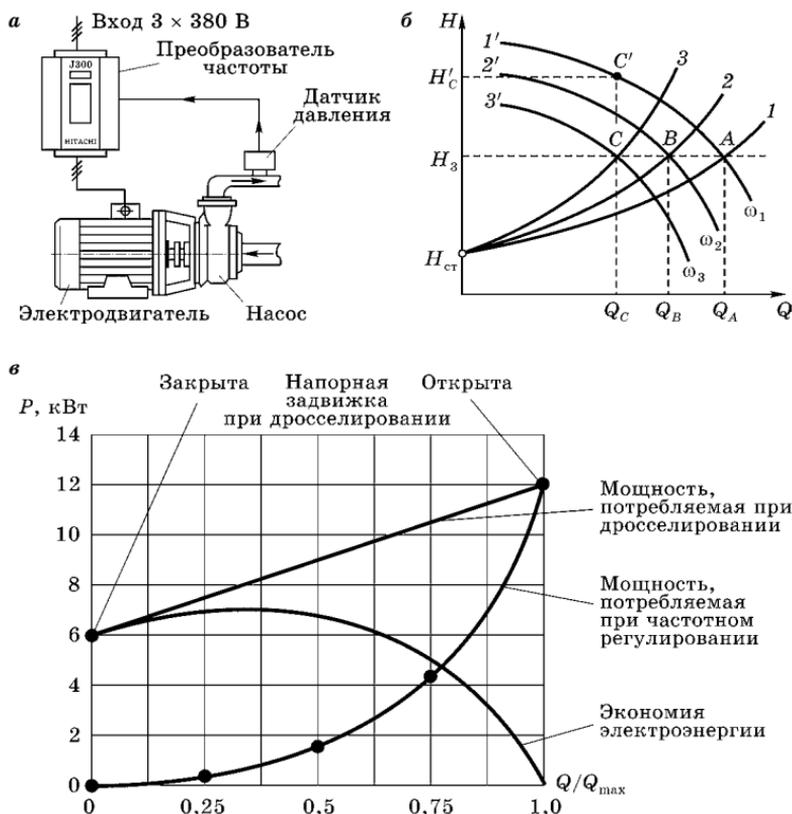


Рис. 4.18

Схема насосного агрегата при стабилизации напора ($H = \text{const}$) и $Q = \text{var}$ (замкнутая система) (*а*); характеристики насоса при различных скоростях (*б*); зависимости потребляемой приводом мощности при различных способах регулирования расхода (*в*)

Если расход изменяется от Q_A до Q_B и Q_C , то рабочая точка $H-Q$ при регулировании скорости перемещается по искусственным характеристикам насоса из A в C , сохранив постоянный напор H_3 . При регулировании расхода дросселированием скорость $\omega = \omega_1 = \text{const}$, рабочая точка перемещается по характеристике $1'$ насоса в C' . В этом случае излишки напора $\Delta H = H'_C - H_3$, а потерянная гидравлическая мощность насоса $\Delta P = \Delta H Q$. Очевидно, что экономичность подобного регулируемого привода будет возрастать с увеличением неравномерности расхода. На рис. 4.18 *в*

приведены зависимости потребляемой мощности привода насоса от относительного расхода при регулировании дросселированием ($\omega = \text{const}$) и при стабилизации напора путем регулирования угловой скорости электродвигателя. Если учесть, что в реальных системах водоснабжения, очистных сооружениях, теплоснабжении расход колеблется в пределах $(0,2 \div 1,0)Q_{\text{ном}}$ в течение суток, то эффективность замкнутых систем регулирования очевидна.

Кроме экономии электроэнергии сберегается ресурс двигателя и насоса из-за снижения скорости, сокращаются потери воды в трубопроводах.

Компенсация падения напряжения на активных сопротивлениях обмотки статора позволяет устранить уменьшение главного потока с понижением частоты ($I \times R$ -компенсация), но при росте нагрузки на индуктивных сопротивлениях (слагаемое $jI_1 x_1$ в (4.28)) это не происходит. Поэтому на практике используются и другие законы управления, например при постоянстве главного потокосцепления, т. е. с компенсацией падения напряжения ($2\pi f_1 L \sigma_1 I_1$). В этом случае ЭДС фазных обмоток будут постоянными, независимо от нагрузки (тока I_1). При таком управлении основной поток двигателя становится несколько больше, чем при $\frac{U}{f} = \text{const}$ и $I \times R$ -компенсации, и остается постоянным при всех частотах и моментах нагрузки. В этом случае возрастает перегрузочная способность двигателя за счет увеличения максимального момента при $s \cong s_k$, а само скольжение будет

$$s_k = \frac{R'_2}{x'_2};$$

напряжение увеличивается на величину $jI_1 x_{\sigma 1}$, характеристики становятся более жесткими, повышаются энергетические показатели.

Возможности современных ПЧ позволяют, кроме сказанного выше, поддерживать постоянство полного потокосцепления ротора независимо от частоты и нагрузки. При этом обеспечивается компенсация падения напряжения на полном сопротивлении обмотки статора ($r_1 + jx_1$) и индуктивном ротора, поддерживается постоянство угла

$\psi_2 = \text{const}$ (например $\psi_2 = \psi_{2\text{ном}}$). В этом случае перегрузочная способность двигателя не ограничена (теоретически) и достигается путем регулирования напряжения. Практически ограничение момента обусловлено насыщением магнитной системы и тепловым состоянием двигателя.

4.8. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Для осуществления частотного способа регулирования скорости АД необходимо иметь преобразователь частоты (ПЧ), позволяющий изменять по требуемому закону как частоту, так и напряжение.

Преобразователи частоты по типу связи с питающей сетью делятся на непосредственные преобразователи частоты (НПЧ) и преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока. В современных приводах применяются, в основном, преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока (рис. 4.19а), основными звеньями которого являются выпрямитель, фильтр звена постоянного тока и автономный инвертор. Напомним, что инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное регулируемой частоты.

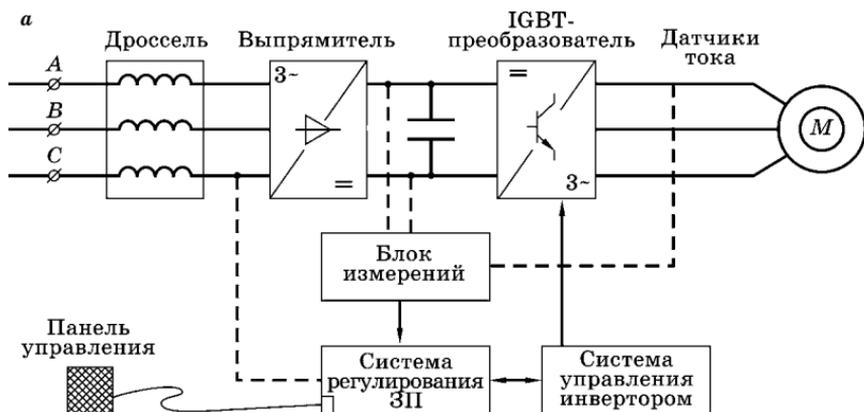
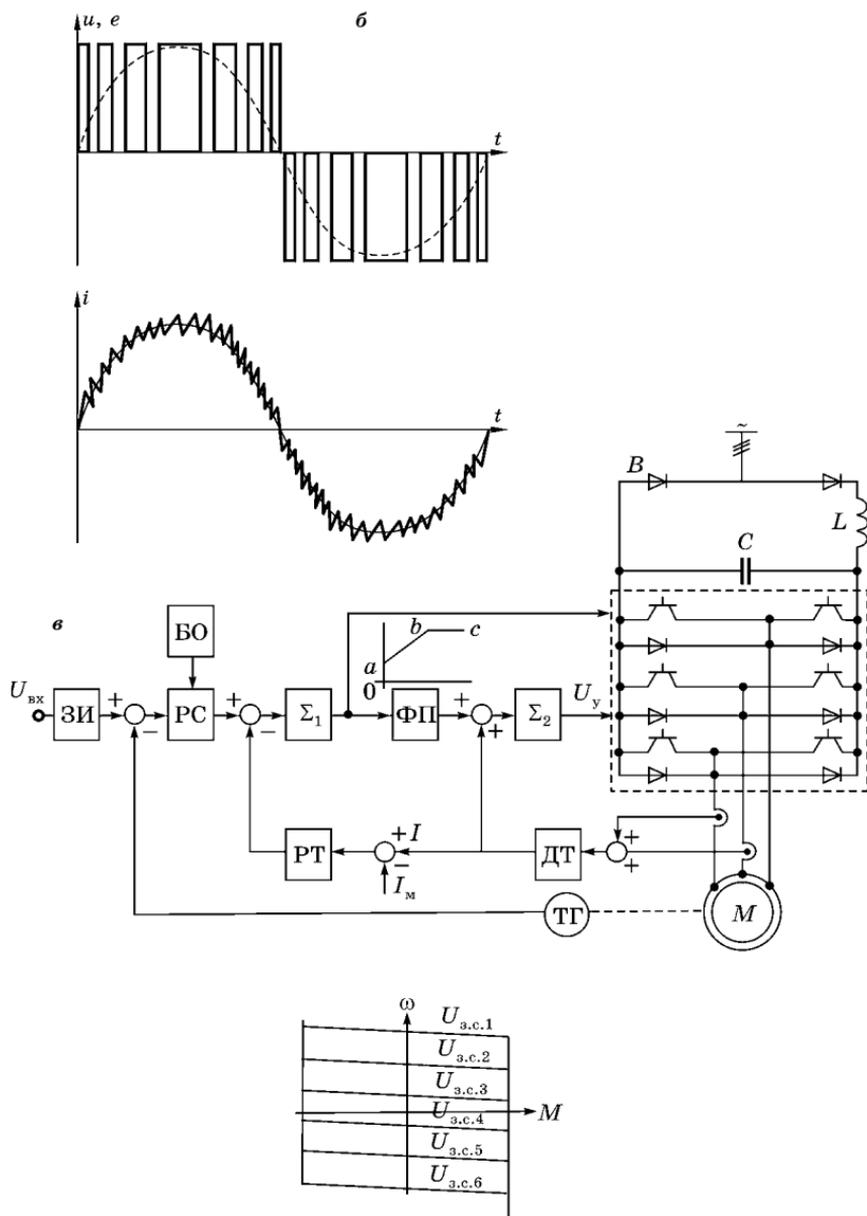


Рис. 4.19

Структурная схема частотно-регулируемого асинхронного привода с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором (АИН) (а); форма кривых напряжений, ЭДС и тока в фазах обмотки



По типу инвертора преобразователи подразделяются на два класса: с автономным инвертором напряжения (АИН) и с автономным инвертором тока (АИТ).

ПЧ с АИН обеспечивает заданную величину и форму выходного напряжения (соотношение U/f), а ПЧ с АИТ — заданную величину и форму выходного тока независимо от параметров нагрузки. При этом форма тока в ПЧ с АИН и напряжения в ПЧ с АИТ определяется как самим выходным сигналом, так и параметрами (характером) нагрузки.

Наибольшее применение в регулируемых асинхронных электроприводах получили преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения (см. рис. 4.19а, в).

ПЧ получает питание от трехфазной сети переменного тока, напряжение через дроссель подается на вход выпрямителя. Дроссель служит для защиты ПЧ от кратковременных скачков напряжения. В ПЧ мощностью до 2 кВт питание возможно и от однофазной сети. В некоторых системах инвертор получает питание непосредственно от сети постоянного тока (контактная сеть электротранспорта) и структура привода соответствует рис. 4.20а.

Преобразователь преобразует синусоидальное переменное напряжение сети в выходное, амплитуда и частота которого могут изменяться в широком диапазоне. Для этого напряжение сети выпрямляется до так называемого напряжения промежуточного звена. Из него с помощью инвертора образуется импульсное выходное напряжение.

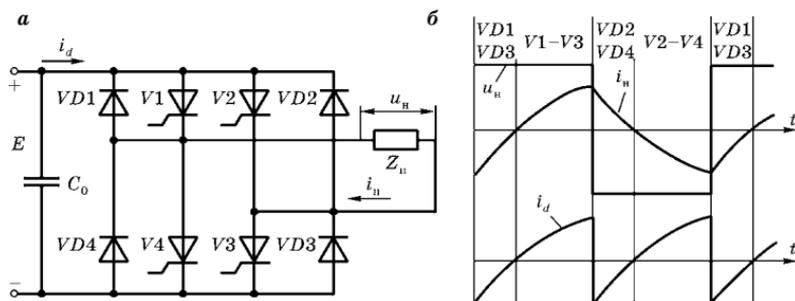


Рис. 4.20

Условная схема однофазного инвертора напряжения (а) и диаграммы токов и напряжений (б) (i_d — ток, потребляемый из сети)

Регулятор варьирует ширину импульса выходного напряжения так, что на индуктивности двигателя устанавливается близкий к синусоидальному ток (широтно-импульсная модуляция = ШИМ) (см. рис. 4.19б).

Выпрямитель может быть как управляемым, так и неуправляемым. Если величина выходного переменного напряжения регулируется в звене постоянного тока, то выпрямитель — управляемый (УВ). В этом случае ПЧ называется ПЧ с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ).

В случае неуправляемого выпрямителя (НУВ) регулирование выходного напряжения осуществляется в звене переменного тока широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) (рис. 4.19б). При этом частота импульсов, промодулированных на полупериоде основной частоты по синусоидальному закону, достигает $(4 \div 16)$ кГц и ток двигателя имеет практически синусоидальную форму (рис. 4.19б). Современные силовые транзисторы типа iGBT, на которых выполняются инверторы, могут работать при частотах до 50 кГц [13, 39, 53]. Большинство современных ПЧ строятся по схеме: НУВ–АИН с ШИМ. Принцип работы АИН поясняется изображенной на рис. 4.20а, б условной схемой однофазного инвертора напряжения, работающего на активно-индуктивную нагрузку.

Вентили V1–V4 включаются и выключаются попарно (V1–V3 и V2–V4) по управляющим сигналам, работают в ключевом режиме (открыт — закрыт). Следовательно, источник постоянного напряжения E подключается к нагрузке с разной полярностью (рис. 4.20а), формируя переменное напряжение прямоугольной формы (рис. 4.20б). Кривая тока при этом будет состоять из отрезков экспонент. При коммутации вентиля ток в индуктивности не может измениться мгновенно и замыкается через обратные диоды VD1–VD4 до значения $i_n = 0$. Затем вступает в работу очередная пара транзисторов, и ток потребляется от источника. Выход выпрямителя (источник) шунтируется конденсатором C_0 , который будет заряжаться, когда ток протекает от инвертора к источнику, и разряжаться, когда ток потребляется от источника. Емкость этого

конденсатора зависит от частоты переключения вентиляей. В ПЧ на тиристорах (по схеме, показанной на рис. 4.20) при частотах до $(100 \div 300)$ Гц величина емкости составляла до 500 мкФ и занимала значительное место по объему, массе и стоимости. В ПЧ на транзисторах при несущей частоте до 16 кГц (см. рис. 4.19) величина емкости невелика (10 мкФ).

Таким образом, основная особенность АИН состоит в том, что независимость напряжения на нагрузке от ее характера достигается введением в схему обратных диодов VD1–VD4, предназначенных для пропуска индуктивного тока нагрузки (рис. 4.20).

В электроприводах с параметрическим частотным управлением, построенных по замкнутой системе (см. рис. 4.19б), за счет использования различных обратных связей и функциональных блоков формируются жесткие механические характеристики при регулировании скорости, ограничиваются ток и момент и обеспечивается требуемое соотношение напряжения и частоты. Формирование управляющих сигналов U_y и f_y производится схемой управления, в состав которой входят: регуляторы скорости РС и тока РТ; датчики скорости ТГ и тока ДТ; суммирующие усилители (П-регуляторы) Σ_1 и Σ_2 . Ограничение тока и момента двигателя производится регулятором тока РТ: при токе статора меньше тока уставки I_m сигнал на выходе РТ равен нулю. При токе, превышающем ток уставки I_m , сигнал на выходе РТ резко увеличивается, при этом снижается и сигнал на выходе Σ_1 . Это приводит к снижению частоты и напряжения, следовательно, к снижению тока статора и момента двигателя. Функциональный преобразователь ФП с характеристикой *Oabc* (см. рис. 4.19в) обеспечивает требуемое соотношение напряжения и частоты, с учетом $I \times R$ -компенсации. Величина $I \times R$ поступает с ДТ на вход сумматора Σ_2 .

В разомкнутых системах без обратных связей отсутствуют РС и ТГ, а сигнал с выхода ЗИ поступает на вход сумматора Σ_1 .

Схема векторного управления АД применяется с целью получения высокого качества и диапазона регулиро-

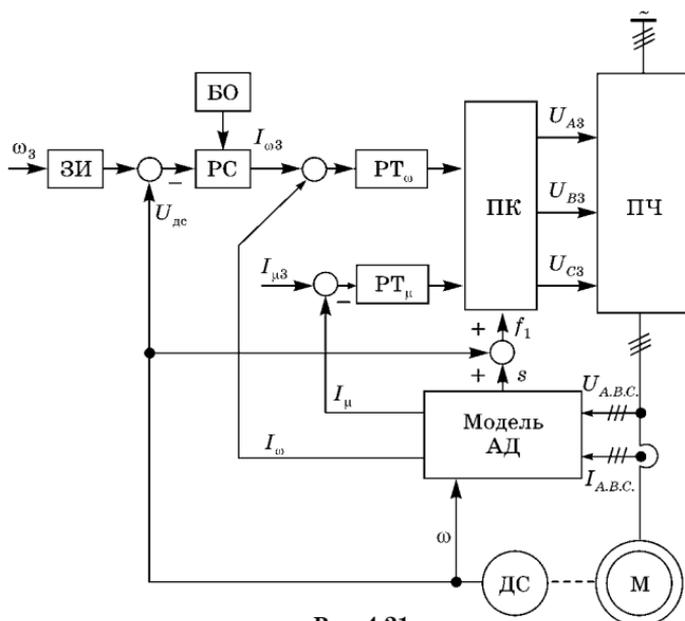


Рис. 4.21

Схема асинхронного электропривода при частотном векторном управлении

вания координат ЭП в установившихся и переходных режимах. Это достигается за счет формирования электромагнитного момента двигателя путем контроля мгновенных значений напряжения, токов и скорости в блоке «модель АД» на рис. 4.21. Векторное регулирование момента АД обеспечивает его точное поддержание во всем диапазоне регулирования скорости, включая и очень низкие скорости, вплоть до работы на упор [8, 11, 13].

В Приложении приведены некоторые технические данные высоковольтных модулей IGBT и преобразователей частоты фирмы SEW.

Поставками элементной базы, самих ПЧ, комплектных приводов, их адаптацией и сервисным обслуживанием занимаются фирмы: ABB, SEW, Hitachi, Siemens, Toshiba, Danfoss и др.

В качестве примера приведем основные показатели асинхронного электропривода скоростного поезда «Сапсан» фирмы Siemens (табл. 4.5):

Таблица 4.5

Характеристики асинхронного привода поезда «Сапсан»

Параметры	Значение
Напряжение контактной сети постоянного тока	$U_{кc} = 3000 \text{ В}$
Масса поезда из 10 вагонов	$m_{п} = 570 \text{ т}$
Максимальная скорость	$V_m = 250 \text{ км/ч}$
Число моторных осей	$n_m = 16$
Мощность асинхронного тягового двигателя	$P_{нд} = 515 \text{ кВт}$
Масса двигателя	$m_d = 800 \text{ кг}$
Номинальная частота вращения	$n_n = 4100 \text{ об/мин}$
Линейное напряжение	$U_{л} = 2300 \text{ В}, f = 190 \text{ Гц}$
КПД двигателя	$\eta_d = 0,96$
Ток фазный	$I_{ф} = 227 \text{ А}$
Максимальная частота вращения	$n_d = 6000 \text{ об/мин}$
Передаточное число редуктора	$i_p = 3,65$
ПЧ (инвертор) на iGBT, один на 4 двигателя	$4 \times 515 \text{ кВт}$
Тактовая частота ШИМ	$f = 30 \div 600 \text{ Гц}$
Диапазон регулирования частоты	$f = 10 \div 210 \text{ Гц}$
Транзисторы iGBT 65 класса, по два последовательно	
Выходной ток ПЧ	$I_{пч} = 1000 \text{ А}$

4.9. ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ПРИВОДАХ ПО СИСТЕМЕ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ — ДВИГАТЕЛЬ»

Технический прогресс приводит к постоянно-му росту концентрации электрических и электронных компонентов на малой площади (пространстве) при одновременном увеличении тактовых частот устройств обработки информации и силовой электроники. Рассмотренные выше системы приводов ПЧ–АД, «ШИП — двигатель постоянного тока» работают при частотах до 20 кГц, транзисторы коммутируют высокие токи и напряжения практически в ключевом режиме. Поэтому все больше увели-

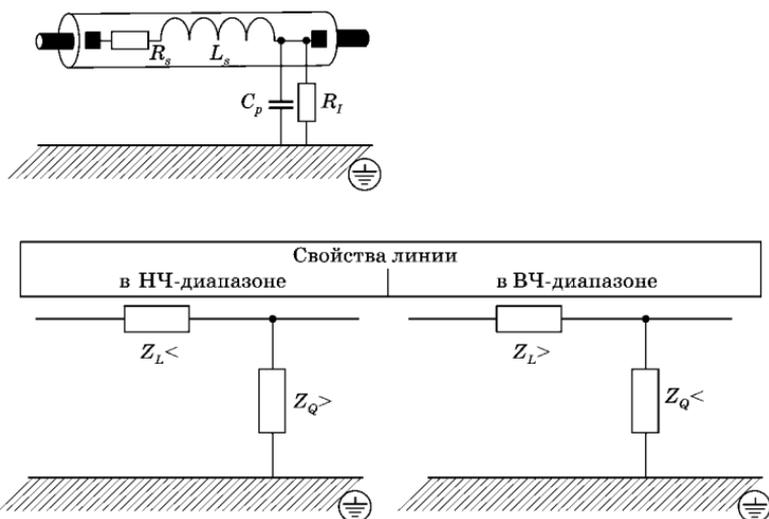


Рис. 4.22

Эквивалентная схема линии:

R_s — последовательное сопротивление; R_i — сопротивление изоляции; L_s — паразитная индуктивность; C_p — паразитная емкость; Z_L — последовательное полное сопротивление; Z_Q — параллельное полное сопротивление.

чивается опасность взаимного воздействия и, как следствие, нарушения функционирования. Электромагнитное влияние (воздействие) сказывается в основном на высоких частотах (~от 500÷100 кГц и выше).

Крутизна фронта импульсов напряжения, следовательно, и спектр частот определяются временем переключения силовых ключей инвертора и для транзисторов iGBT $t_\phi = (1\div 5)$ нс [39, 55]. Прохождение импульсного сигнала с крутым фронтом вызывает переходные процессы в цепи АИН — кабель — АД. Сам кабель при этом рассматривается как длинная линия с распределенными параметрами [14, 55] (рис. 4.22), волновое сопротивление которой

$z = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$. Значения параметров (усредненные) принимают: $L_k \cong 1$ мкГн/м; $C_k \cong 50$ пФ/м, скорость распространения волны в такой линии

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{L_k \cdot C_k}} \cong 140 \cdot 10^6 \text{ м/с,}$$

$$\text{длина волны } \lambda = \frac{2\pi v_{\Phi}}{\omega_{\Phi}} \cong 30 \text{ м, а частота}$$

$$\omega_{\Phi} = 2\pi f_{\Phi} = 2\pi \frac{1}{t_{\Phi}} = \frac{\pi}{t_{\Phi}}.$$

Время T_{Φ} прохождения фронта импульса от выхода АИН до зажимов АД зависит от длины кабеля и скорости v_{Φ} . Если $T_{\Phi} \geq t_{\Phi}$, то в конце кабеля, т. е. на зажимах АД, возникает отраженная волна напряжения $n_2 U_1$, которая, суммируясь с прямой волной U_1 , образует стоячие волны. В результате напряжение на клеммах АД будет $U_2 = U_1(1 + n_2)$, где $0 \leq n_2 \leq 1$ — коэффициент отражения, $n_2 = n_{2\max} \frac{T_{\Phi}}{t_{\Phi}}$ при $T_{\Phi} < t_{\Phi}$. Таким образом, от λ и v_{Φ} зависит критическая длина кабеля $l_{\text{кр}}$. Считается [14], что $l_{\text{кр}} \cong \frac{\lambda}{2}$, при этом к обмоткам приложены импульсы напряжения, близкие к двойному напряжению источника U_d . В зависимости от характеристики iGBT, мощности АД и типа кабеля $l_{\text{кр}} \cong 7 \div 20$ м.

Перенапряжения в сочетании с высокой крутизной фронтов импульсов приводят к снижению срока службы изоляции и даже пробоям. Кроме того, при этом в изоляции возникают заметные диэлектрические потери. Для АД, работающих от ПЧ, требования по сопротивлению изоляции выше, $R_{\text{из}} \geq 2$ МОм. Электромагнитная совместимость узлов установки и всей системы в целом (уровень помех, помехоустойчивость) достигается в основном выполнением требований к монтажу: тип и длина кабеля, экран, заземления, фильтры [56].

Кроме указанных выше явлений работа преобразователя оказывает негативное влияние на сеть: импульсный режим вызывает появление высших гармоник напряжения сети, и оно перестает быть синусоидальным. На рис. 4.23а представлен однофазный сетевой выпрямитель с конденсатором, демонстрирующий механизм появления гармоник. Конденсатор заряжается в те промежутки времени, когда напряжение сети выше, чем на конденсаторе. Поэтому ток в подводящей линии имеет форму коротких высоких несинусоидальных пиков подзарядки. Они, в свою очередь, вызывают на сопротивлении сети Z паде-

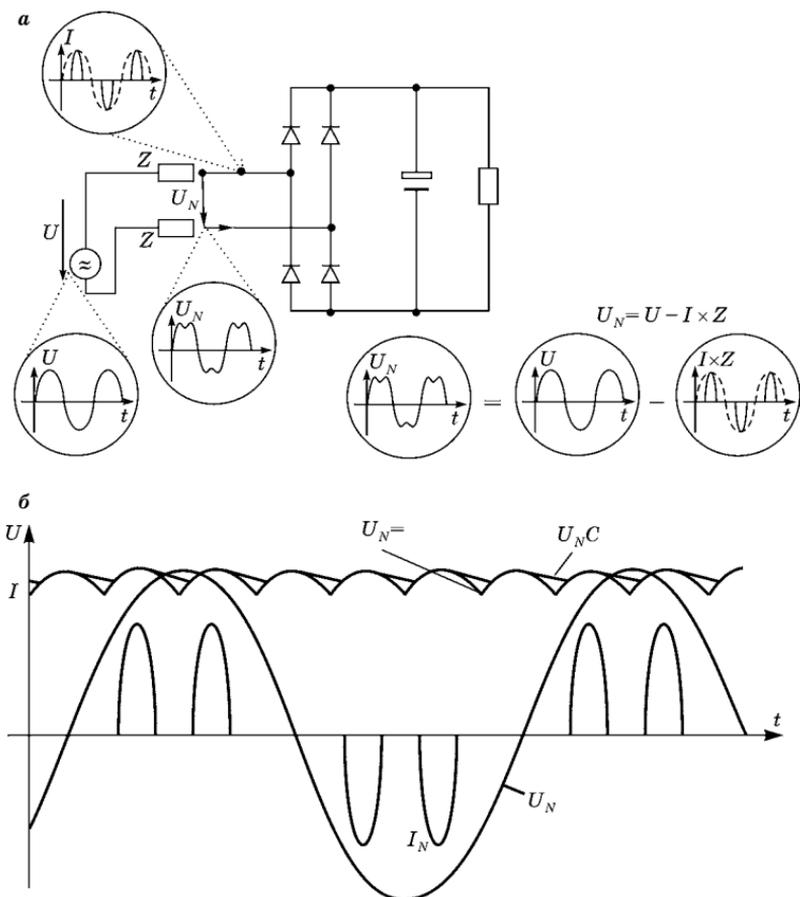


Рис. 4.23
Сетевой выпрямитель с конденсатором (а):

Z — сопротивление линии; напряжение и токи в преобразователе (б): I_N — ток сети; U_N — напряжение сети «фаза — фаза»; U_N — выпрямленное напряжение сети; U_{NC} — напряжение на конденсаторе промежуточного контура.

ния напряжения. Оно становится ощутимым для других потребителей, подключенным к точкам (U_N), как искажение напряжения. Изображенные на рис. 4.23 зависимости, по сути, являются проявлением закона Ома для полной цепи. На рис. 4.23б представлены подобные характеристики, но для трехфазного выпрямителя как звена постоянного тока в преобразователе частоты.

Большое содержание высших гармоник может привести к пиковым нагрузкам и просадке напряжения в сети. Эти явления, возникающие постоянно или случайным образом и в экстремальных случаях, могут вызвать разрушение подключенных приборов. Генераторами сетевых гармоник могут быть: устройства плавного пуска (УПП), ПЧ, ТРН, ШИП, дуговые электропечи, люминесцентные лампы, насыщенные магнитные цепи-дроссели, трансформаторы и др. Сетевые гармоники вызывают повышенные потери в трансформаторах и двигателях, кабелях (в том числе и диэлектрические), нагрев и старение конденсаторов, ошибки измерений и т. д.

Уменьшают влияние сетевых гармоник с помощью компенсирующих устройств, сетевого дросселя, подключением через разделительный трансформатор.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково число полюсов асинхронного двигателя при номинальной частоте вращения $n_n = 1440$ об/мин? Может ли быть номинальная частота вращения $n_n = 1575$ об/мин.
2. Как зависит максимальный момент асинхронного двигателя от напряжения питания?
3. Почему нельзя повышать напряжение больше чем на 10% от номинального?
4. Какой параметр двигателя определяет критическое скольжение?
5. Почему при введении дополнительного сопротивления в цепь ротора АДФР увеличивается скольжение? В каких приводах рационально использовать АДФР?
6. Назовите способы пуска АДКЗР.
7. Почему при снижении напряжения питания и $M = \text{const}$ увеличивается потребляемый ток?
8. Способы регулирования скорости АД.
9. Какие из способов регулирования экономичны, а какие нет (по потреблению электроэнергии)?
10. Почему при частотном регулировании с изменением частоты необходимо регулировать и напряжение?
11. Соотношение U/f при регулировании с постоянным моментом $M = \text{const}$ и при вентиляторной нагрузке, $M \propto \omega^2$?
12. Зачем в ПЧ вводится $I \times R$ -компенсация, особенно на низких частотах?
13. Что такое АИН, АИТ? Поясните принцип работы.
14. Какие способы регулирования напряжения используются в ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока?

5 ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С СИНХРОННЫМИ, ВЕНТИЛЬНЫМИ И ЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

5.1. ЭЛЕКТРОПРИВОД С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

5.1.1. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ: УСТРОЙСТВО, ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Синхронные двигатели (СД) нашли широкое распространение в нерегулируемых электроприводах мощных центробежных и поршневых насосов и компрессоров, вентиляторов, газо- и воздуходувок, мельниц, дробилок и др. благодаря высоким технико-экономическим показателям:

1. СД позволяют регулировать коэффициент мощности изменением тока возбуждения и могут работать при $\cos \varphi = 1$, что приводит к снижению потерь в самой машине и линиях электроснабжения. На практике приводы большой мощности работают, как правило, с опережающим $\cos \varphi = (0,8 \div 0,9)$, отдают в сеть реактивную мощность, улучшая режим ее работы.

2. КПД современных синхронных двигателей составляет $0,96 \div 0,98$, что на 1–3% выше, чем у асинхронных двигателей тех же габаритов, из-за отсутствия потерь скольжения ($\Delta P_{\text{эл2}} = sP_{\text{эм}}$ у АД).

3. Момент СД зависит от напряжения в первой степени (у асинхронного двигателя $M \equiv U^2$), поэтому он менее чувствителен к колебаниям напряжения сети.

4. Максимальный момент, следовательно, и перегрузочную способность СД можно регулировать изменением тока возбуждения (основной ЭДС E_0).

5. Абсолютно жесткая механическая характеристика, возможность изготовления двигателей на очень большие мощности (до 100 МВт) при низких частотах вращения (до 125 об/мин).

Практика показывает, что при нечастых пусках синхронные двигатели экономически выгодны по сравнению с асинхронными при мощностях $P \geq 200$ кВт несмотря на большую стоимость.

Разработка и массовый выпуск недорогих высокоэнергетических постоянных магнитов Nd-Fe-B позволили создавать синхронные двигатели без обмотки возбуждения (магнитоэлектрические машины), что дает еще большие преимущества с точки зрения экономичности, надежности и управляемости.

Конструктивно синхронные машины с электромагнитным возбуждением выполняются двух типов: с явнополюсным ротором (рис. 5.1а) [20, 21] и с неявнополюсным (полнополюсным) (рис. 5.1б). Обмотка возбуждения располагается на роторе и питается постоянным током через щетки и кольца. Двигатели выполняются, как правило, явнополюсными при частотах вращения $n < 1500$ об/мин и полнополюсными при $n = 1500$ об/мин и 3000 об/мин.

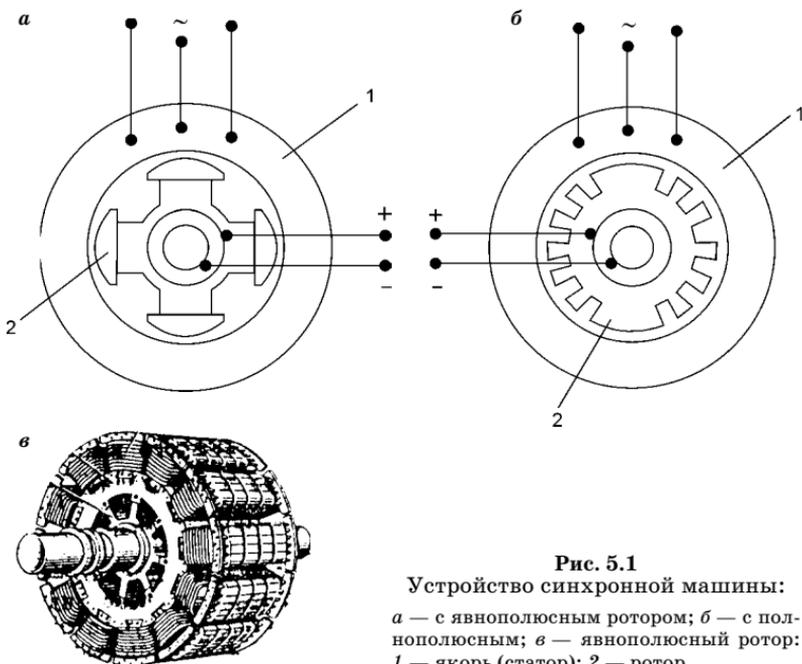


Рис. 5.1

Устройство синхронной машины:

а — с явнополюсным ротором; б — с полнополюсным; в — явнополюсный ротор; 1 — якорь (статор); 2 — ротор.

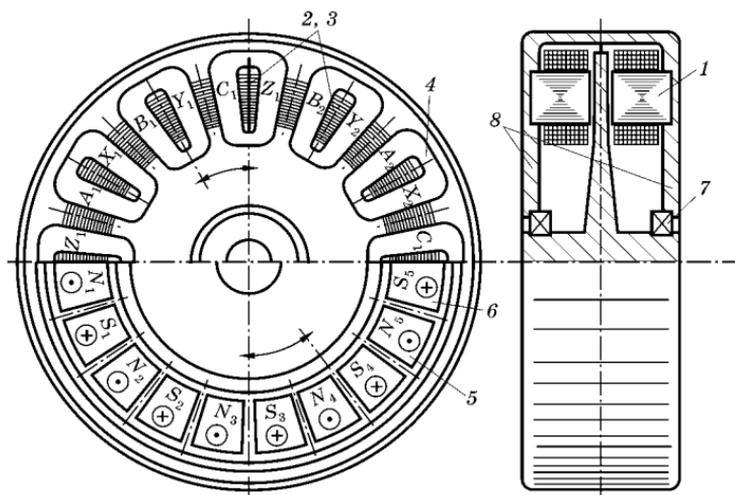


Рис. 5.2

Устройство синхронной машины дискового типа:

1 — якорь; 2, 3 — зубцы (полюса) якоря; 4 — катушка обмотки якоря; 5, 6 — полюса ротора (постоянные магниты); 7 — подшипник; 8 — корпус.

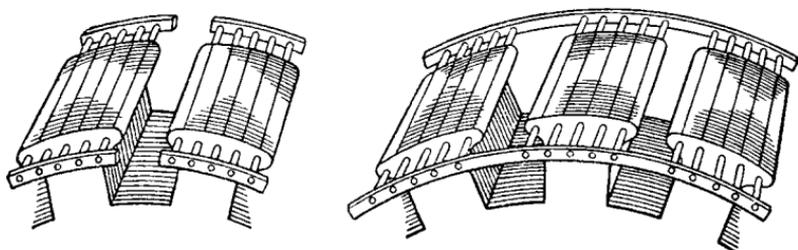


Рис. 5.3

Демпферные (пусковые) обмотки синхронных машин

Двигатели с постоянными магнитами могут быть и дисковой конструкции (рис. 5.2), они используются в специальных приводах, когда необходимо сократить аксиальные размеры машины при некотором увеличении момента инерции.

Известно, что сам синхронный двигатель при питании от сети не имеет пускового момента. На практике в большинстве случаев используется асинхронный пуск СД. Для этого на роторе двигателя закладывается дополнительная короткозамкнутая пусковая обмотка (рис. 5.3), а пуск СД проводится прямым включением в сеть.

По достижении частоты вращения, близкой к n_0 , включается ток возбуждения и двигатель «втягивается в синхронизм» [20]. Операции по пуску синхронных приводов, как правило, автоматизированы.

Основной характеристикой СД является угловая характеристика, т. е. зависимость электромагнитного момента M (или мощности P_m) от внутреннего угла Θ , представляющего собой угол сдвига между ЭДС обмотки статора E_0 и напряжением сети U или, что то же самое, между осями результирующего магнитного потока в зазоре $\Phi\delta$ и полюсов (продольная ось d , поток Φ_0).

Уравнение равновесия напряжений синхронного двигателя (для фазы)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + r_a \dot{I} + jx_q \dot{I}_q + jx_d \dot{I}_d, \quad (5.1)$$

где \dot{I} — ток обмотки статора; \dot{I}_q , \dot{I}_d — составляющие тока по поперечной (q) и продольной (d) осям; x_q , x_d — индуктивные сопротивления машины по осям q и d соответственно [21].

Уравнению (5.1) соответствует изображенная на рис. 5.4 векторная диаграмма. Электромагнитный момент синхронного двигателя

$$M = \frac{mUE_0}{\omega_0 x_d} \sin \Theta + \frac{mU^2}{2\omega_0} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta, \quad (5.2)$$

где первый член выражения определяет основную составляющую момента (активную)

$$M_1 = \frac{mUE_0}{\omega_0 x_d} \sin \Theta, \quad (5.3)$$

которая зависит как от напряжения, так и от тока возбуждения или ЭДС E_0 .

Второй член выражения (5.2) определяет дополнительную составляющую момента, свойственную реактивным двигателям, и не зависит от тока возбуждения

$$M_2 = \frac{mU^2}{2\omega_0} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta. \quad (5.4)$$

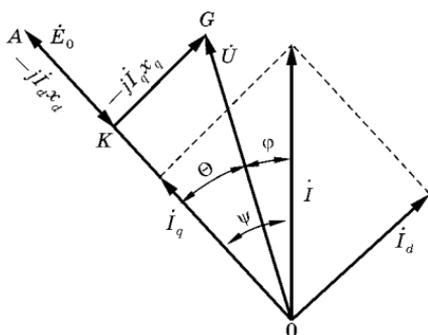


Рис. 5.4
Векторная диаграмма
синхронной машины

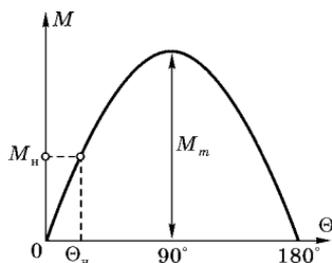


Рис. 5.5
Угловая характеристика
синхронного двигателя

Таким образом, явнополюсная машина развивает момент и при $E_0 = 0$, т. е. поток реакции якоря стремится пройти через ротор по продольной оси d . Момент M_2 имеет наибольшее значение при $\Theta = 45^\circ$. Для полнополюсного двигателя характерен момент только по (5.3), так как здесь $x_d = x_q$ и вторая составляющая $M_2 = 0$.

Из (5.2)–(5.4) следует, что при $\Theta = \frac{\pi}{2}$, $\sin \Theta = 1$, $\sin 2\Theta = 0$ и $E_0 = \text{const}$ момент принимает наибольшее значение. Зависимость момента синхронного двигателя от внутреннего угла представлена на рис. 5.5.

Следовательно, устойчивая работа двигателя будет при $0 < \Theta < \frac{\pi}{2}$, а при $\Theta > \frac{\pi}{2}$ двигатель выпадает из синхронизма.

Отношение $\frac{M_m}{M_n}$, как и в других приводах, называется перегрузочной способностью. Обычно $\frac{M_m}{M_n} = 2 \div 2,5$, а угол Θ в номинальном режиме $\Theta_n = 25 \div 30^\circ$.

Из (5.2) также видно, что изменением напряжения и основной ЭДС E_0 (или тока возбуждения i_f) можно регулировать максимальный момент M_m , т. е. перегрузочную способность двигателя. Отметим еще раз, что момент СД зависит от напряжения в первой степени, поэтому он менее чувствителен по сравнению с АД к колебаниям напряжения сети.

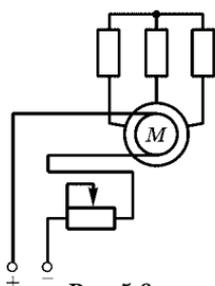


Рис. 5.6
 Схема включения
 двигателя при
 динамическом
 торможении

При работе двигателя с переменным моментом нагрузки средняя скорость его остается неизменной, равной ω_0 , но в некоторых пределах $\pm\Delta\Theta$ изменяется угол Θ . При этом пусковая обмотка выполняет роль демпферной (успокоительной) и обеспечивает быстрое затухание колебаний. Синхронный двигатель может работать и в режиме генератора параллельно с сетью при синхронной угловой скорости, тогда угол Θ принимает отрицательные значения, ротор становится ведущим звеном, а поле статора — ведомым [20, 21]. Очевидно, что такой режим для торможения практического значения не имеет, так как $\omega_0 = \text{const}$.

Для торможения СД чаще используется динамический режим, когда двигатель отключается от сети и работает на резистор как автономный генератор (рис. 5.6). Синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением или постоянными магнитами является основной частью машинно-вентильной системы, называемой вентильным двигателем (см. 5.2).

5.1.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Возможность регулирования коэффициента мощности является одним из основных достоинств синхронных двигателей.

Работа систем электроснабжения характеризуется потреблением реактивной мощности, в основном, асинхронными двигателями. Это вызывает дополнительные потери энергии в звеньях системы, необходимо иметь повышенную пропускную способность подстанций и распределительных сетей. В связи с этим для повышения технико-экономических показателей системы электроснабжения производится компенсация реактивной мощности.

Коэффициент мощности СД при конкретной нагрузке зависит от установленного тока возбуждения. Можно уста-

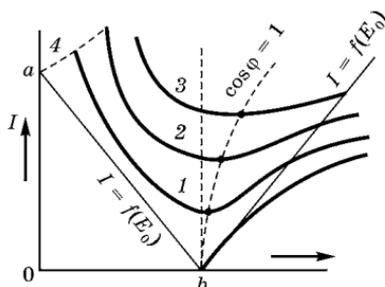


Рис. 5.7
U-образные характеристики синхронной машины при разных значениях мощности ($P_1 < P_2 < P_3$)

новить такой ток возбуждения i_f , чтобы $\cos \varphi = 1$ при определенной мощности. Тогда при снижении нагрузки двигатель будет работать с опережающим $\cos \varphi$, а при увеличении — с отстающим. На практике мощные двигатели работают в режиме автоматического регулирования $\cos \varphi$ при изменении нагрузки. Необходимо отметить, что при $M = \text{const}$ и $i_f = \text{var}$ изменяется и ток обмотки статора, что в целом определяется *U*-образными характеристиками, приведенными на рис. 5.7 для различных значений активной мощности (кривые 1, 2, 3).

Используя СД в качестве источника реактивной мощности, необходимо обеспечивать повышенные токи обмоток возбуждения и якоря, следовательно, увеличивать полную мощность машины. Вопрос «на сколько?» является основным при экономическом обосновании способа компенсации.

Отношение полной мощности к активной [10]

$$\frac{S}{P} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{P} = \sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2}, \quad (5.5)$$

где $S = mUI$, $Q = mUI \sin \varphi$, $P = mUI \cos \varphi$.

Например, требуется, чтобы реактивная опережающая мощность составляла 40% активной составляющей,

т. е. $\frac{Q}{P} = 0,4$. Расчет по (5.5) показывает, что при этом

отношение $\frac{S}{P} = 1,08$, т. е. генерирование указанной реактивной мощности потребует увеличения полной мощности всего на 8%, что говорит о высокой эффективности такой системы.

5.1.3. УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Системы управления электроприводами с СД в общем случае должны обеспечивать пуск и синхронизацию СД с сетью, регулирование скорости и торможение, регулирование тока возбуждения с целью изменения максимального момента и коэффициента мощности.

При неизменной или медленно меняющейся нагрузке (насосы, вентиляторы и др.) СД должны иметь кратность пускового момента

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} = 0,4 \div 0,6,$$

входного момента (при скорости $\omega \approx 0,95\omega_0$)

$$\frac{M_{\text{вх}}}{M_{\text{н}}} = 0,8 \div 1,2,$$

перегрузочную способность

$$\frac{M_m}{M_{\text{н}}} = 1,5 \div 2.$$

При пульсирующей нагрузке (станки-качалки в нефтедобыче, поршневые компрессоры и др.) требования к СД практически не отличаются от перечисленных выше.

Особые требования предъявляются к двигателям для приводов дробилок, прокатных станков. В таких системах

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} = 1,2 \div 2, \quad \frac{M_m}{M_{\text{н}}} = 2,5 \div 3,5.$$

Для улучшения показателей работы сети и обеспечения устойчивости СД в электроприводах этого класса осуществляется регулирование тока возбуждения, как правило, автоматическое (АРВ). Общие требования к системе АРВ следующие [2, 4, 11]:

1. Обеспечение устойчивой работы СД при заданных режимах нагрузки.
2. Поддержка напряжения в узле нагрузки, к которому подключены СД.
3. Обеспечение минимальных потерь энергии в системе электроснабжения и самом двигателе.

4. Возможность выдачи повышенной реактивной мощности за счет форсирования возбуждения при кратковременных снижениях напряжения.

Принципы автоматического регулирования возбуждения СД в статических и динамических режимах различны. Для статических режимов чаще используется регулирование при постоянстве $\cos \varphi$; постоянстве вырабатываемой реактивной мощности; постоянстве напряжения или $\cos \varphi$ в узле нагрузки; минимуме потерь энергии.

Регулирование на основе $\cos \varphi = \text{const}$ СД целесообразно для приводов средней и большой мощности с плавно изменяющейся нагрузкой при незначительных колебаниях напряжения в сети. При $\cos \varphi = 1$ обеспечивается минимум потерь в СД и питающей сети.

При значительных колебаниях напряжения в узлах нагрузки для поддержания его постоянства используется регулирование возбуждения. В этом случае должно быть предусмотрено ограничение тока возбуждения снизу по условиям устойчивости (ограничение момента снизу) и сверху по условиям нагревания СД.

Задачи АРВ в динамических режимах работы электропривода заключаются в повышении динамической устойчивости СД при изменениях нагрузки на валу. Здесь основное требование к системе АРВ сводится к обеспечению высокого быстродействия. Это достигается за счет повышения кратности форсировки тока возбуждения, использования малоинерционных звеньев в системе АРВ (тиристорные возбудители), введения гибких обратных связей (по производным координат).

Для запуска СД, как отмечалось ранее, чаще используется асинхронный пуск. При прямом подключении к сети кратность пускового тока Для мощных приводов $\frac{I_{п}}{I_{н}} = 4 \div 5$. возникает необходимость ограничения пусковых токов, что реализуется использованием реакторов, устройств плавного пуска, как и для асинхронных двигателей (см. главу 4).

Для регулирования скорости синхронных электроприводов, как и асинхронных, применяются преобразователи

частоты, позволяющие формировать требуемые характеристики в статических и динамических режимах.

Синхронный электропривод обладает некоторыми свойствами, не присущими частотно-управляемому асинхронному приводу в разомкнутых системах:

1) стабильность угловой скорости независимо от момента нагрузки во всем диапазоне регулирования $\omega = \omega_0$;

2) высокая точность синхронного движения нескольких исполнительных органов;

3) возможность реализации больших моментов при малых скоростях, получаемых за счет соответствующего регулирования напряжения и тока возбуждения.

Электромагнитный момент явнополюсного СД по (5.2), пренебрегая насыщением магнитной системы, можно представить в виде

$$M = A \frac{U \cdot i_f}{f} \sin \Theta + B \left(\frac{U}{f} \right)^2 \sin 2\Theta, \quad (5.6)$$

где i_f — ток возбуждения; A и B — постоянные коэффициенты.

Основные режимы управления СД вытекают из (5.6) [2, 21]:

1. Регулирование при $f = \text{const}$, $U = \text{var}$, $i_f = \text{var}$ характерно для нерегулируемого по скорости двигателя. При этом (5.6) можно записать

$$M = c_1 U i_f \sin \Theta + c_2 U^2 \sin \Theta. \quad (5.7)$$

Угловые характеристики СД $M(\Theta)$ представлены на рис. 5.8а, б. Видно, что изменением напряжения и тока возбуждения возможно в широких пределах регулировать момент двигателя. Однако не следует забывать, что при этом возрастает ток статорной обмотки, изменяется коэффициент мощности, двигатель работает с перевозбуждением ($i_f > i_{fн}$) или с недовозбуждением ($i_f < i_{fн}$).

2. Режим частотного регулирования электропривода при $\frac{U}{f} = \text{const}$, $i_f = \text{var}$.

$$\begin{cases} \Delta W_{2п0}'' = \frac{J\omega_{01}^2}{2} = \frac{J\omega_{02}^2}{8} \\ \Delta W_{2п0}'' = \frac{J\omega_{02}^2}{2} (s_{нач}^2 - s_{кон}^2) = \frac{J\omega_{02}^2}{8} \end{cases}$$

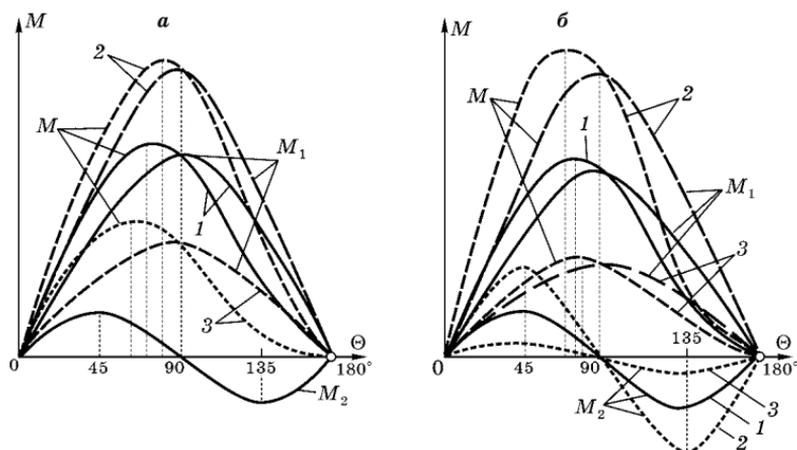


Рис. 5.8

Моментно-угловые характеристики синхронного двигателя:

a — при $U = \text{const}$, $i_f = \text{var}$; *б* — при $U = \text{var}$, $i_f = \text{const}$; M_1 — момент от поля возбуждения; M_2 — момент от явноплюсности; M — суммарный момент; 1 — $i_f = i_{fn}$ (или $U = U_n$); 2 — $i_f > i_{fn}$ (или $U > U_n$); 3 — $i_f < i_{fn}$ (или $U < U_n$).

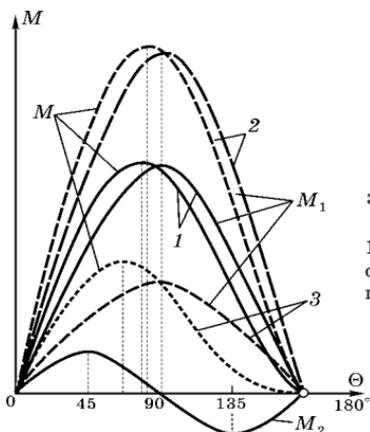


Рис. 5.9

Моментно-угловые характеристики частотно-регулируемого синхронного электропривода при $\frac{U}{f} = \text{const}$, $i_f = \text{var}$:

1 — $i_f = i_{fn}$; 2 — $i_f > i_{fn}$; 3 — $i_f < i_{fn}$; M_1 — момент от поля возбуждения; M_2 — момент от явноплюсности; M — суммарный момент.

Уравнение (5.6) можно записать как

$$M = c_3 i_f \sin \Theta + c_4 \sin \Theta. \quad (5.8)$$

Характеристики $M(\Theta)$ для этого случая представлены на рис. 5.9.

Как и в предыдущем случае, момент СД изменяется за счет регулирования основного потока (тока возбуждения i_f) и машина работает при $I = \text{var}$, $\cos \varphi = \text{var}$.

Закон регулирования при условии постоянства угла Θ и тока возбуждения $i_f = \text{const}$, приняв, что $U \approx E$, получают из соотношения

$$\frac{U}{U_n} = \frac{f}{f_n} \sqrt{\frac{M}{M_n}}, \quad (5.9)$$

т. е. он имеет тот же вид, что и для асинхронного двигателя (см. главу 4).

Для различного вида нагрузок остаются соотношения:

$\frac{U}{f} = \text{const}$ при $M = M_n = \text{const}$, при $P = P_n = \text{const}$; при вентиляторной нагрузке.

При частотном регулировании СД наиболее сложным является соблюдение $\Theta = \text{const}$ в динамических режимах. Реально темп изменения частоты должен быть строго согласован с моментом инерции нагрузки, так как асинхронный режим здесь недопустим. В целом же частотное регулирование СД ограничено устойчивостью работы машины.

3. Режим частотного регулирования синхронного электропривода при $U = \text{const}$, $i_f = \text{const}$, $f = \text{var}$. Соотношение (5.6) запишется при этом

$$M = \frac{C_5}{f} \sin \Theta + \frac{C_6}{f} \sin 2\Theta, \quad (5.10)$$

где $C_5 = AU i_f$; $C_6 = BU^2$.

Видно, что при снижении частоты момент СД возрастает, особенно составляющая от явнополюсности (второе слагаемое). Следовательно, при низких угловых скоростях двигатель обладает значительным максимальным моментом (рис. 5.10). При этом, однако, существенно увеличивается ток обмотки статора.

При $f \rightarrow 0$ противо-ЭДС обмотки $E_1 \rightarrow 0$, индуктивные сопротивления $x \rightarrow 0$, и при $r = 0$ (принятое допущение) $M \rightarrow \infty$, $I \rightarrow \infty$. Поэтому неучет активного сопротивления статора вносит заметные искажения в расчетные значения момента при низких частотах. Однако здесь по сравнению с асинхронными двигателями это влияние может быть в некоторой степени скомпенсировано регулированием возбуждения.

В целом частотное регулирование скорости СД характеризуется теми же показателями, что и частотное регулирование асинхронных двигателей: плавное, экономичное, двухзонное; высокая стабильность скорости; диапазон регулирования вниз может быть до 100:1 при обеспечении синусоидальности напряжения, необходимого запаса устойчивости и сохранении значений максимального момента.

Схема включения синхронного двигателя с преобразователем частоты не отличается от приведенной на рис. 4.19в.

Однако частотно-управляемый синхронный электропривод не получил широкого практического применения, главным образом, из-за свойственных синхронным машинам колебаний и неустойчивости работы, особенно в зоне низких скоростей. Но сама синхронная машина используется в вентильном электроприводе, о чем пойдет речь в следующем параграфе.

5.2. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ВЕНТИЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Двигатель постоянного тока, обладая хорошими регулировочными свойствами, во многих случаях не может удовлетворить практические потребности в современном автоматизированном электроприводе. Наличие коллектора и щеточного аппарата снижает надежность машины, ограничивает предельные значения токов, мощностей и скорости вращения, применение по некоторым

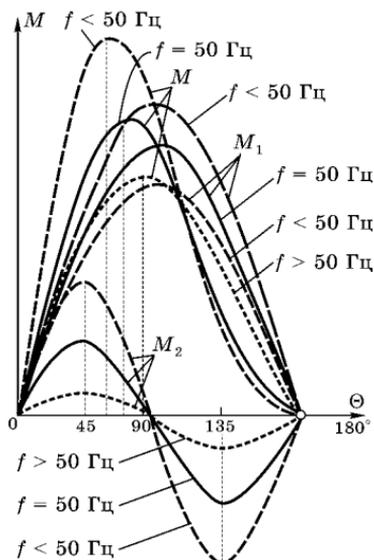


Рис. 5.10

Моментно-угловые характеристики синхронного двигателя при $U = \text{const}$, $i_f = \text{const}$, $f = \text{var}$:

M_1 — момент от поля возбуждения;
 M_2 — момент от явноплюсности;
 M — суммарный момент.

условиям окружающей среды. Поэтому замена коллекторной машины постоянного тока бесщеточной давно привлекла внимание разработчиков. Использование статического преобразователя, выполняющего те же функции, что и механический коммутатор (коллектор), стало практически возможным с освоением и массовым выпуском управляемых силовых полупроводниковых приборов — тиристоров и транзисторов.

Таким образом, бесщеточная машина постоянного тока представляет собой совокупность синхронной машины и преобразователя. Такая машинно-вентильная система получила название «вентильный двигатель». Вентильный электропривод, кроме двигателя и преобразователя, включает в себя систему управления с датчиком положения ротора [31, 43, 59].

Управление (регулирование координат) вентильным электроприводом производится так же, как и приводом постоянного тока — изменением напряжения питания якоря и основного потока (при электромагнитном возбуждении).

В двигателе постоянного тока механический коллектор инвертирует постоянный ток в многофазный переменный. Частота основной гармоники этого тока жестко связана с частотой вращения якоря при любых скоростях. Поэтому коммутация тока в секции (или фазе) происходит при ее определенном положении относительно индуктора (главных полюсов). Угол нагрузки, т. е. угол между осями результирующего магнитного поля в зазоре и полюсов, имеет ограниченное изменение.

В вентильном двигателе частота коммутации тока в фазах задается частотой вращения ротора. Источником напряжения синхронизации является датчик положения ротора (ДПР), механически сочлененный с валом машины.

Разработка постоянных магнитов Nd-Fe-B и создание машин с бесконтактным возбуждением существенно расширили области применения вентильных машин: мощный высоко- и низкоскоростной электропривод, гребные двигатели для судов и подводных лодок, привод насосов и

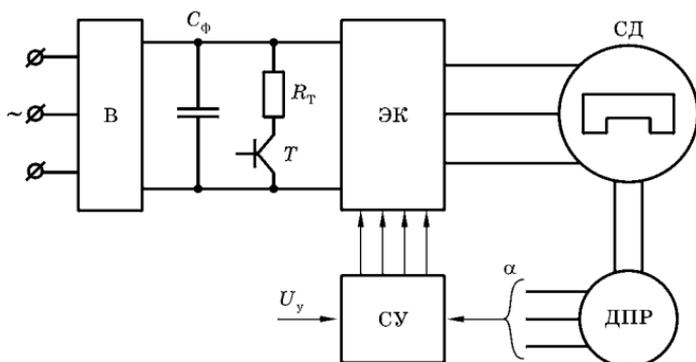


Рис. 5.11

Структурная схема вентильного электропривода:

В — выпрямитель; *T*, *R_т* — тормозные транзистор и резистор; ЭК — электронный коммутатор (преобразователь); СД — синхронный двигатель; ДПР — датчик положения ротора; СУ — система управления.

компрессоров для перекачки нефти и газа, прокатных станков. Двигатели малой мощности широко используются в аудио- и видеотехнике, бытовой аппаратуре, электроприводах различных механизмов в автомобилях. Мощности вентильных машин — от нескольких ватт до десятков мегаватт, частоты вращения — от единиц до десятков тысяч об/мин [13, 31, 43].

На рис. 5.11 представлена функциональная схема вентильного привода, состоящего из выпрямителя *В*, конденсатора фильтра *C_φ*, резистора *R_т* и транзистора *T*, электронного коммутатора ЭК, СД с постоянными магнитами (СД), датчика положения ротора ДПР и системы управления СУ. При этом система управления принимает информацию о положении ротора (угол α), сигнал задания U_z и вырабатывает сигналы для управления электронным коммутатором, который осуществляет периодическое (дискретное) переключение фазных обмоток статора. Система работает в режиме инвертора тока. Это приводит к изменению пространственного положения вектора магнитного потока статора и созданию электромагнитного момента. На рис. 5.12 показана схема электронного коммутатора, собранного на силовых транзисторах VT1–VT6.

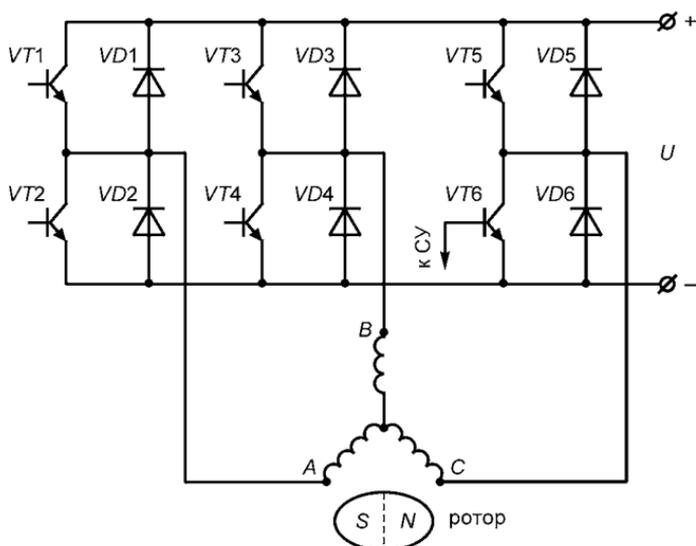


Рис. 5.12

Принципиальная схема электронного коммутатора (преобразователя) на транзисторах VT1-VT6

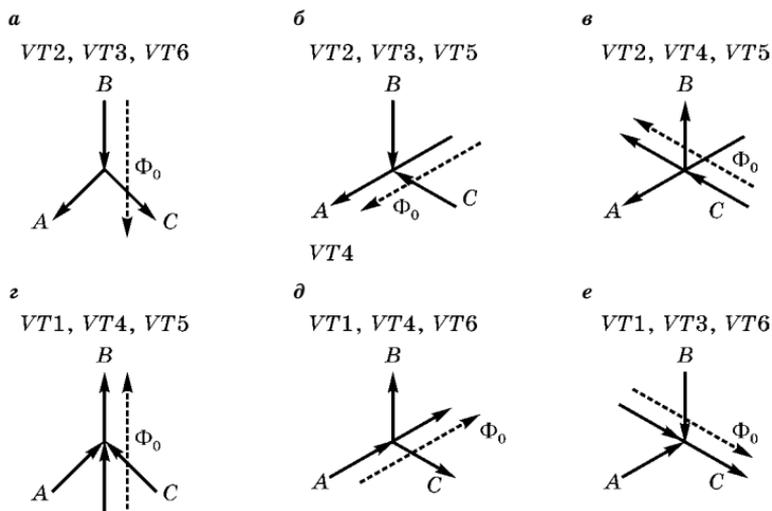


Рис. 5.13

Временные диаграммы фазных токов и результирующего потока статора Φ_0 при проводимости вентилей:

a — VT2, VT3, VT6; *б* — VT2, VT3, VT5; *в* — VT2, VT4, VT5; *г* — VT1, VT4, VT5; *д* — VT1, VT4, VT6; *е* — VT1, VT3, VT6.

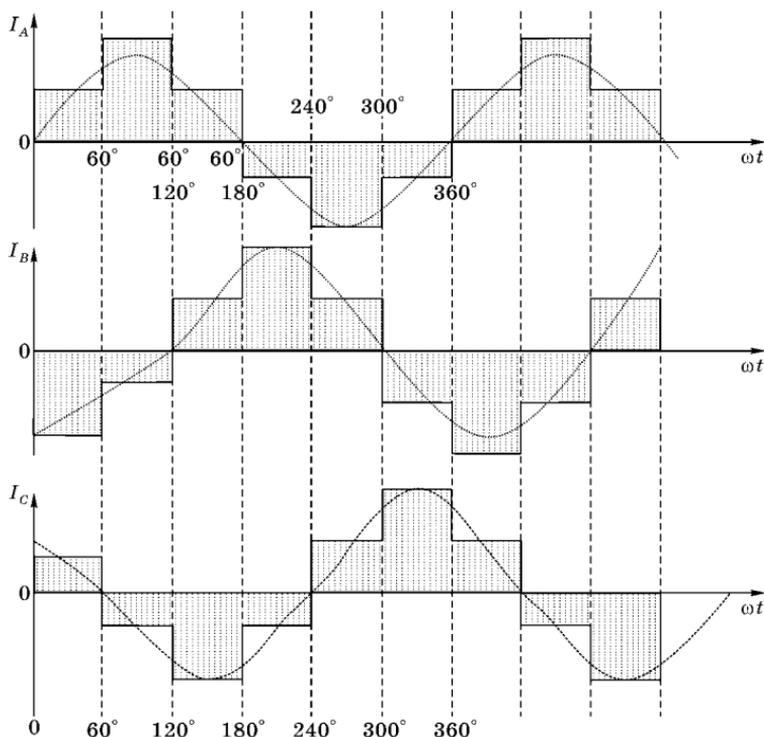


Рис. 5.14

Временные диаграммы фазных токов вентильного двигателя

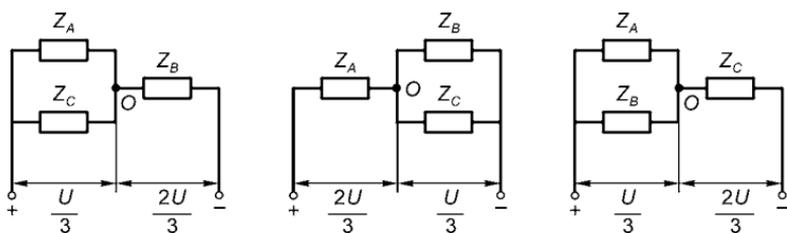


Рис. 5.15

Схемы соединения фаз нагрузки (Z_A , Z_B , Z_C) для трех интервалов времени за один полупериод

Электронная коммутация фаз обмотки статора производится через каждые 60 электрических градусов по сигналам ДПР. Диаграммы распределения токов по фазам и времени, направления потока статора Φ_0 за один полный оборот приведены на рис. 5.13–5.14. На рис. 5.13 указаны

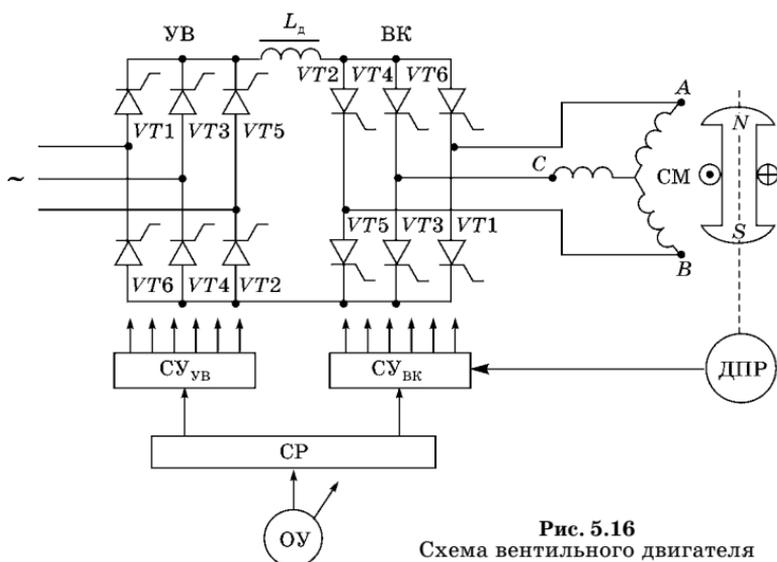


Рис. 5.16
Схема вентильного двигателя со звеном постоянного тока и инвертором тока:

ОУ — орган управления; СР — система регулирования; СУ_{УВ} — система управления управляемым выпрямителем; СУ_{ВК} — система управления вентильным коммутатором.

Порядок коммутации элементов ВК

Номер коммутации	I	II	III	IV	V	VI
Номера тиристоров	1	1	5	5	3	3
	2	4	4	6	6	2

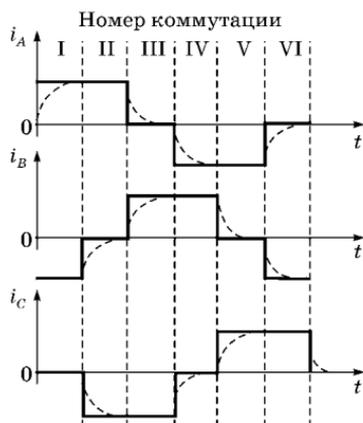


Рис. 5.17
Кривые изменения фазных токов ВД при питании от ВК (непрерывная линия — идеальные ключи; штриховая — реальные ключи)

номера транзисторов, открытых для приведенных на рис. 5.15 схем соединения фазных обмоток.

На рис. 5.16 представлена схема вентильного привода с инвертором тока и управляемым выпрямителем на входе. Регулирование напряжения возможно и в звене инвертора с использованием широтно-импульсной модуляции. Для порядка коммутации вентилях, когда они работают попарно (рис. 5.17), поочередно включаются по две фазы последовательно, а картина токов представлена на том же рисунке (штриховые линии отражают действие индуктивностей). Токи задают фазные МДС F_A , F_B и F_C , геометрическая сумма которых создает вектор МДС трехфазной обмотки якоря $F_a = F_A + F_B + F_C$. На рис. 5.18 показано пространственное расположение векторов для моментов времени, соответствующих принятому порядку коммутации элементов ВК.

Таким образом, в зазоре машины образуется бегущее («прыгающее») магнитное поле статора, которое делает шаги по 60° , увлекая за собой ротор. Коммутация токов в фазах происходит следующим образом: вначале вектор потока статора (ведущего звена) опережает поток ротора на 120° , а в конце, перед новым скачком (следующей

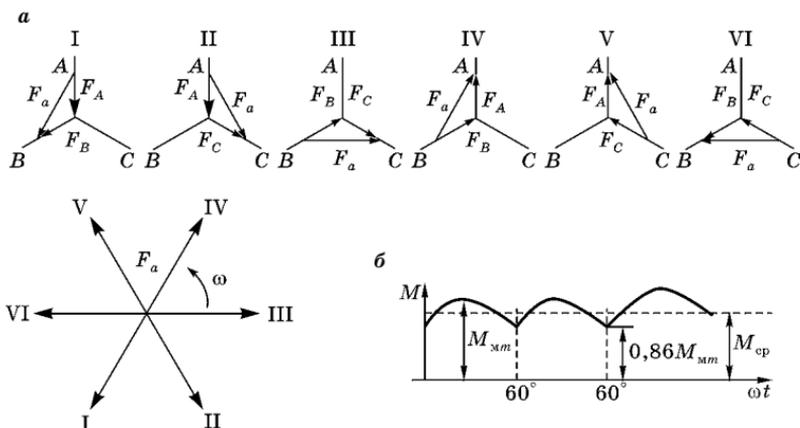


Рис. 5.18

Изменение пространственного расположения изображающих векторов фазных МДС (F_A , F_B , F_C) и МДС трехфазной обмотки якоря (F_a) в процессе коммутации ВК (а); зависимость электромагнитного момента двигателя (б)

коммутацией) на 60° . Очевидно, что при этом электромагнитный момент изменяется по величине: наибольший при угле между векторами потоков в 90° и меньший при углах 60° и 120° ; $M_{\min} = M_{\text{мм}} \cos 30^\circ = 0,86 M_{\text{мм}}$. На рис. 5.18б приведена зависимость момента от угла поворота ротора. Видно, что при дискретном управлении возникают значительные пульсации момента. Для получения $M_{\text{м}} = \text{const}$ в ответственных приводах разработаны и используются непрерывные (синусные) методы управления коммутацией фаз. При этом силовой модуль питания СД выполняется по схеме инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией, обеспечивающей синусоидальную форму выходного напряжения и управляемый ДПР. Кроме того, в мощных двигателях используются шестифазные обмотки (две трехфазные, сдвинутые на 30°), питаемые от двух независимых преобразователей частоты [43].

При питании от инвертора напряжения [5, 31, 43] система управления обеспечивает непрерывную пространственную ориентацию вектора фазного напряжения (результатирующего потока) относительно продольной оси ротора (ЭДС E_0), т. е. задает угол $\theta = \text{const}$.

При питании от инвертора тока [3, 31, 43] ДПР задает угол между вектором тока I и ЭДС E_0 , т. е. $\psi = \text{const}$. При этом угол $\theta = \psi - \varphi$ не контролируется и может изменяться в некоторых пределах в зависимости от момента нагрузки.

Величина электромагнитного момента вентильного двигателя определяется как

$$M_{\text{м}} = \frac{mEI_q}{\omega} + \frac{mI_d I_q}{\omega} (L_d - L_q), \quad (5.11)$$

где I_q, I_d, L_q, L_d — составляющие тока статора и индуктивности по поперечной q и продольной d осям.

При $I_q = I, I_d = 0$, т. е. при ортогональности основного потока ротора и потока реакции якоря получим, подобно машинам постоянного тока,

$$M_{\text{м}} = mpw\Phi_0 I = M_{\text{мм}}. \quad (5.12)$$

Значение момента по (5.12) есть не что иное, как первое слагаемое в (5.11).

Энергетические показатели ВД из-за двукратного преобразования энергии могут быть несколько ниже, чем у двигателей постоянного тока, а механические характеристики имеют меньшую жесткость.

5.3. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ЛИНЕЙНЫМИ АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

В настоящее время около 40–50% серийных электродвигателей эксплуатируется в производственных механизмах с поступательным или возвратно-поступательным движением рабочего органа.

Для преобразования вращательного движения в поступательное используются разнообразные устройства: пневмо- и гидропередача; пара «винт — гайка»; кривошипно-шатунный механизм; шестерня и рейка; колесо и путевая структура в транспортных системах и др. Кроме того, в таких приводах, как правило, используются редукторы, являющиеся источником дополнительных потерь и отказов.

Линейные электродвигатели позволяют непосредственно осуществить поступательное движение без механического контакта между первичной (обычно статором) и вторичной (ротором) структурами, следовательно, исключить передаточный механизм. При этом значительно упрощается кинематическая схема, повышается надежность, точность управления, а сами линейные электродвигатели хорошо приспособляются к исполнительному механизму, обладают технологичностью в производстве и меньшим расходом стали благодаря малоотходному раскрою.

На практике применяются линейные двигатели постоянного тока (в основном — шаговые), асинхронные (ЛАД), синхронные (ЛСД) и электромагнитные (ЛЭМД).

Наибольшее распространение получили линейные асинхронные двигатели в силу их конструктивной простоты, дешевизны, технологичности изготовления, надежности, разнообразия конструктивных решений.

Из информационных источников известно о широком и успешном использовании ЛАД в приводах конвейеров, робототехнических комплексов, задвижек для трубопроводов,

плунжерных насосов, ткацких станков, в рудничном транспорте, металлургии и многом другом. В агропромышленном комплексе используются линейные электроприводы колебательного движения в зерноперерабатывающей и пищевой промышленности [30].

Самые крупные проекты с использованием ЛАД связаны с созданием высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) на магнитном подвесе со скоростями до 500 км/ч [28, 29]. В 70–90-е гг. XX в. научно-исследовательские работы по этой проблеме проводились во многих странах, в том числе и в Советском Союзе. Были созданы и испытаны физические модели, опытные экипажи, построены коммерческие транспортные системы при скоростях до 100 км/ч (Канада, Англия, Япония), которые работают до сих пор. Однако дальнейшие разработки пока приостановлены — возможности пары «колесо — рельс» еще не исчерпаны (в 1990 г. поезд TGV (Франция) достиг скорости 515 км/ч, а в 2007 г. — 575 км/ч).

Наиболее просто можно представить ЛАД, если мысленно разрезать по образующей обычный асинхронный двигатель (рис. 5.19а) и развернуть его в плоскость [27]. При этом возможны варианты — прямой (короткий индуктор, статор) (рис. 5.19в) и обращенный (короткий вторичный элемент и длинный статор) (рис. 5.19г).

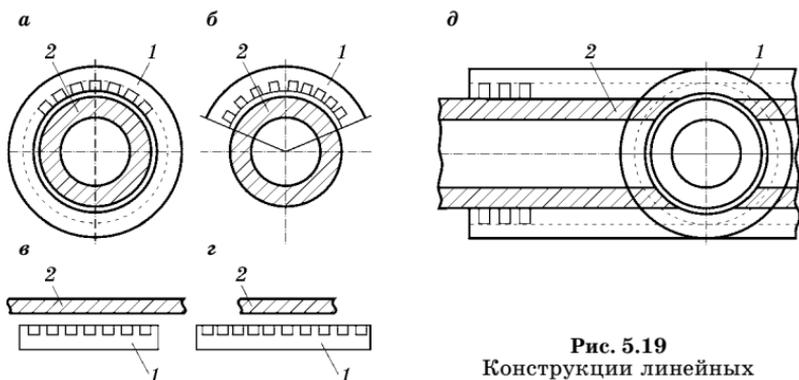


Рис. 5.19
Конструкции линейных асинхронных двигателей:

а — вращающийся АД; б — дугостаторный двигатель; в — ЛАД с коротким индуктором; г — ЛАД с длинным индуктором; д — цилиндрический ЛАД; 1 — индуктор; 2 — ротор.

Принцип действия ЛАД ничем не отличается от вращающегося АД: трехфазная обмотка индуктора создает магнитное поле, бегущее со скоростью $v = 2\tau f$. При скольжении $s \neq 0$ оно индуцирует во вторичном элементе (реактивной шине) ЭДС, а взаимодействие поперечной составляющей токов шины и нормальной составляющей индукции в зазоре $B\delta$ создает тяговое усилие F . Так же как и во вращающемся двигателе, сопротивление вторичного контура (шины) определяет жесткость механической характеристики $v(F)$.

Изображенный на рис. 5.19б дугостаторный двигатель, предложенный в 1936 г. П. А. Фридкиным, можно рассматривать как модификацию ЛАД. Его особенностью является зависимость частоты вращения ротора не только от частоты f и полюсного деления τ , но и от диаметра ротора. Широкого применения эти машины не нашли из-за низких показателей — энергетических и использования материалов.

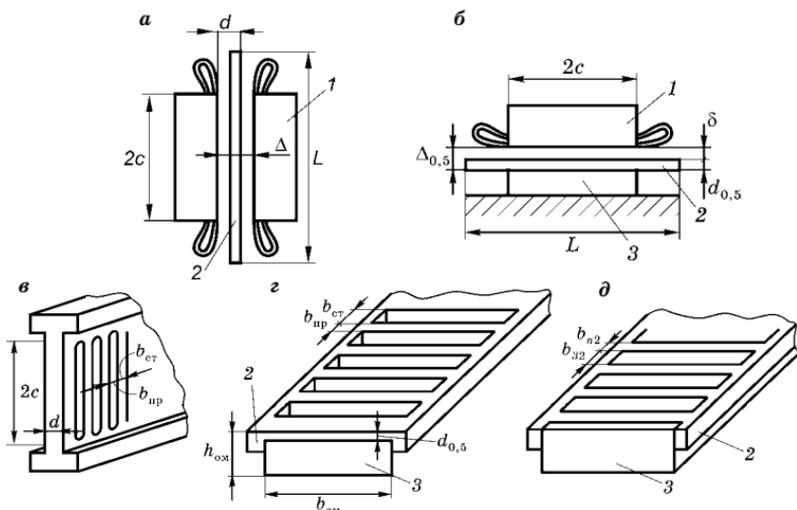


Рис. 5.20

Устройство плоских линейных асинхронных двигателей:

1 — индуктор с обмоткой (статор); 2 — вторичная структура (реактивная шина); 3 — обратный магнитопровод; а — двухсторонний ЛАД; б — односторонний ЛАД; в — шлицованная РШ; з, д — короткозамкнутая клетка с обратным магнитопроводом; b, c, d, h, L, δ — размеры соответствующих элементов конструкции.

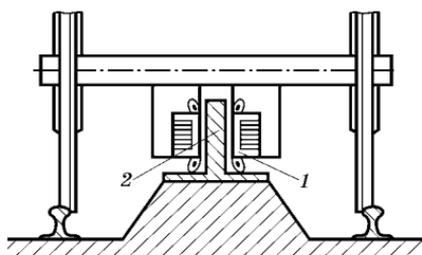


Рис. 5.21
Применение ЛАД
для рельсового транс-
портного средства
(патент Зедена):
1 — индуктор; 2 — реактив-
ная шина.

Конструктивно ЛАД выполняется в основном в двух формах: цилиндрический (рис. 5.19*д*) и плоский (рис. 5.20). Цилиндрические двигатели имеют лучшие удельные показатели, но гораздо сложнее в изготовлении. Применяются в приводах механизмов возвратно-поступательного движения, например для привода выключателей — разъединителей. Плоские ЛАД [27, 28, 29] могут быть двух- и односторонними (ДЛАД, ОЛАД) (рис. 5.20*а, б*). Вторичная структура (шина) может быть сплошной (рис. 5.20*а, б*), шлицованной (рис. 5.20*в*), в виде короткозамкнутой клетки в пазах обратного магнитопровода (рис. 5.20*г, д*). Обмотки индукторов могут быть однослойными и двухслойными. На рис. 5.21 приведена схема ДЛАД рельсового транспортного средства (1902 г., патент А. Зедена).

Бесконтактная передача усилия, следовательно, возможность получать значительные ускорения определили использование ЛАД для испытаний моделей судов в опытовых бассейнах (рис. 5.22) При этом за счет укорочения участков разгона и торможения при достижении высоких скоростей удалось существенно сократить длину бассейнов.

На рис. 5.23 приведены схемы линейных электроприводов колебательного движения [30]. Такие системы работают, как правило, при импульсном питании (включен/выключен). Их достоинства заключаются в возможности регулирования амплитуды колебаний (до 0,5 м), обеспечения автоколебательного режима и снижения потерь, получения высоких ускорений. Отметим, что в электроприводах с механическим преобразователем (кривошипно-шатунный механизм) при максимальных ускорениях порядка 100 м/с^2 достигаемая амплитуда колебаний рабочего органа не более $(0,05 \div 0,15) \text{ м}$. Управление парамет-

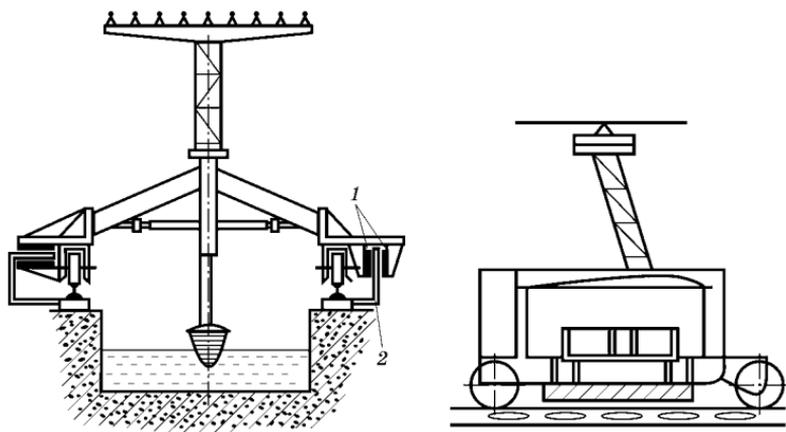


Рис. 5.22
Применение ЛАД для опытового бассейна:

1 — индуктор; 2 — реактивная шина.

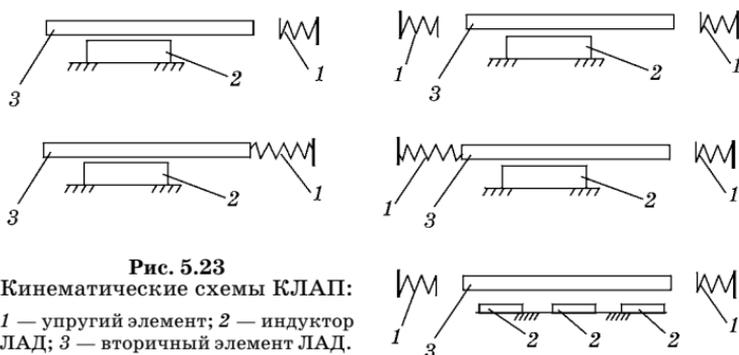


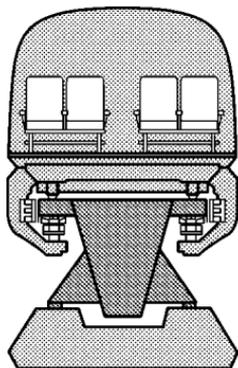
Рис. 5.23
Кинематические схемы КЛАП:
1 — упругий элемент; 2 — индуктор
ЛАД; 3 — вторичный элемент ЛАД.

рами движения осуществляется так же, как и вращающихся АД: изменением сопротивления вторичной структуры, напряжения, регулированием частоты и длительности включений. По такой схеме работают инерционные конвейеры для транспортирования влажного сахара и ворошители бункеров-питателей сыпучих грузов, вибрационной транспортировки штучных грузов, сепарации сыпучих материалов, лесопильных рам и др. [30]. Приводы работают в режиме авто- или вынужденных колебаний.

В сфере АПК ЛАД могут быть использованы для привода монорельсового внутреннего транспорта теплиц и животноводческих комплексов [59].

5.4. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ЛИНЕЙНЫМИ СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Линейные синхронные двигатели (ЛСД) наряду с ЛАД с 1970-х гг. рассматривались в качестве одного из основных типов тягового двигателя высокоскоростного наземного транспорта. Предполагалось размещение индуктора на экипаже с использованием сверхпроводимости, а обмотку статора — на путевой структуре. В Германии в 1980-1990-е гг. на полигоне в Эмсланде были испытаны полномасштабные образцы экипажей при скоростях до 400 км/ч. На системы TRANSRAPID уже были получены заказы из США, Канады. В самой Германии был готов проект линии Берлин — Гамбург и определено начало строительства — 1996 г. (рис. 5.24). Однако из-за высокой стоимости проекта, а также в связи с созданием новых высокоскоростных колесных поездов (Япония, Франция, Германия) строительство так и не началось. С 1990-х гг. в Шанхае (Китай) эксплуатируется пассажирская линия длиной 30 км по системе TRANSRAPID.



Использование ЛСД привлекало в основном возможностью получения высокого $\cos \varphi$ (близкого к единице) при больших воздушных зазорах (до нескольких сантиметров).

В настоящее время ЛСД как серводвигатели находят применение в специальном машиностроении, станкостроении, в сборочных технологиях,

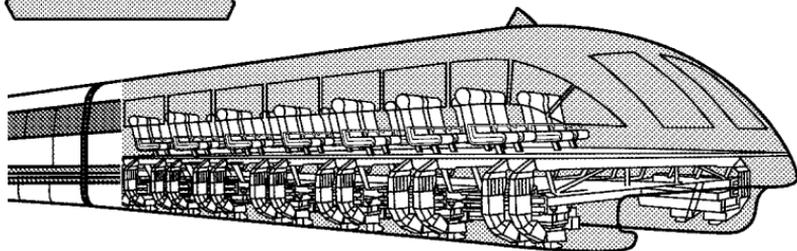


Рис. 5.24

Компоновка систем тяги, подвеса и пассажирского салона поезда системы TRANSRAPID

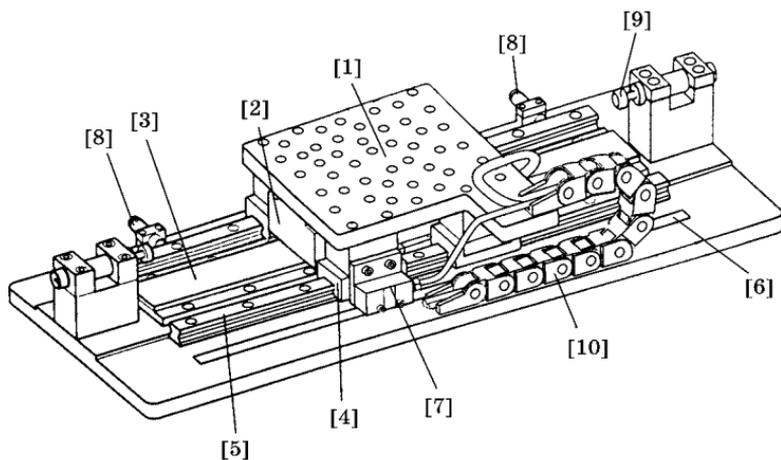


Рис. 5.25

Линейная приводная система:

1 — платформа первичной части; 2 — первичная часть (подвижная); 3 — вторичная часть (неподвижная); 4 — направляющая тележка; 5 — направляющая; 6 — измерительная шкала; 7 — считывающая головка датчика положения; 8 — концевой выключатель; 9 — буфер; 10 — подводка питания.

упаковочной технике, системах переработки грузов (транспортировки), где требуются максимальная динамика и точность позиционирования. Обычно ЛСД встраивается в саму рабочую машину (рис. 5.25). Такой двигатель обладает следующими преимуществами по сравнению с ротационной системой: реализация более высоких скоростей и ускорений; прямой привод без редуктора, следовательно, без люфта; практически полное отсутствие износа; более высокая точность позиционирования.

Промышленные ЛСД выполняются, как правило, с постоянными магнитами, с длинным (см. рис. 5.26а) и коротким (рис. 5.26б) статором [38, 55]. Основные требования при изготовлении и монтаже ЛСД связаны с точным соблюдением \min воздушного зазора, что обеспечивается системой линейных направляющих и монтажной платформой.

На рис. 5.27 приведена форма механической характеристики ЛСД. Развиваемое двигателем усилие определяется взаимодействием магнитных полей статора и ротора (см. 5.1), зависит от угла момента θ по угловой характеристике (см. рис. 5.5).

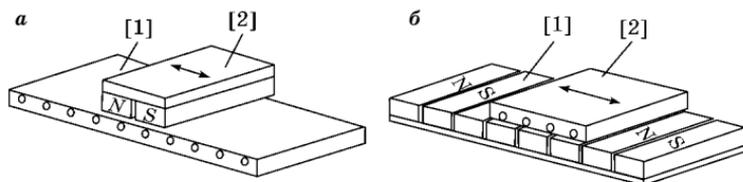


Рис. 5.26

Конструкция с длинным статором (а),
конструкция с коротким статором (б):

а: 1 — первичная часть: статор с обмоткой; 2 — вторичная часть: реактивная часть с возбуждением от постоянных магнитов; б: 1 — вторичная часть: реактивная часть с возбуждением от постоянных магнитов; 2 — первичная часть: статор с обмоткой.

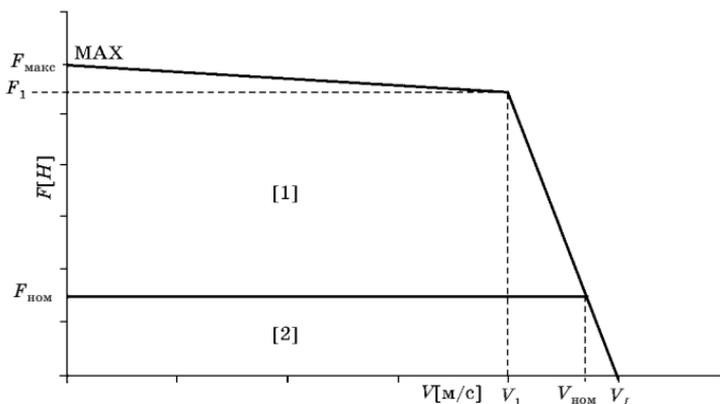


Рис. 5.27

Механическая характеристика:

1 — зона динамического ограничения усилий; 2 — зона теплового ограничения усилия; $F_{ном}$ — номинальное усилие [Н].

Для работы ЛСД необходима измерительная система, контролирующая положения подвижной части. По данным этой системы в соответствующем сервоусилителе рассчитывается скорость и выполняется позиционирование. Чаще используются оптические системы измерений перемещения; магнитные системы измерения; индуктивные системы контроля перемещений [8, 57, 61].

В качестве сервоусилителя применяются, в основном, ПЧ со звеном постоянного тока. Регулируемые величины — частота и напряжение, определяющие скорость и ускорение.

5.5. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД) являются электромеханическими преобразователями энергии ударного действия и относятся к классу специальных электрических машин. Непосредственно силовым преобразователем ЛЭМД выступает электромагнит постоянного тока, работающий, как правило, в импульсном режиме [36, 41, 57]. Дискретность вводимой в объект энергии позволяет повысить ее плотность, варьируя длительность и интенсивность воздействия. Это относится к процессам разрушения горных и мерзлых пород, забивки свай, стержней, электродов заземления, бурения скважин, обрушения сводов при разгрузке сыпучих грузов, в том числе и зерна. Именно ударный способ силового воздействия обладает наименьшей энергоемкостью по сравнению с другими (например, при разрушении горных пород в 40–400 раз ниже, чем для электрофизического, ультразвукового или гидравлического [57]).

Для ударных машин (пневматических, гидравлических, электрических) энергия удара W_y составляет до 300 кДж. Такие машины представляют собой, как правило, крупногабаритные устройства.

ЛЭМД в этом плане выгодно отличаются компактностью, достаточно высокой энергией удара (до 1 кДж), автономностью питания от источников ограниченной мощности. Последнее обстоятельство особенно привлекательно в условиях сельскохозяйственного производства: забивка стержней при обустройстве пастбищ, разрушение кирпичной кладки, ремонт дорожного покрытия и др. В них сочетаются конструктивная простота и надежность, они наиболее приспособлены к приводным механизмам, в которых рабочий орган совершает возвратно-поступательное движение (см. рис. 5.28). При подаче импульса напряжения на обмотку возбуждения якорь втягивается внутрь обмотки и совершается удар бойка по инструменту. По окончании питающего импульса якорь под действием пружины возвращается в исходное положение. Основные характеристики ЛЭМД: энергия удара, $W_y \leq 1$ кДж; частота ударов n_y , зависящая от массы подвижной части, электромагнитного

усилия $F_{эм} = \frac{1}{2} \frac{B_{\delta}^2 S}{\mu_0}$, длины хода якоря. Энергия удара W_y ,

равная кинетической энергии якоря с бойком, может быть определена через силу $F_{эм}$ и длину хода δ , как $W_y = F_{эм} \delta$. Мощность ЛЭМД $P_y = W_y n_y$. Частота ударов n_y до 10 с^{-1} , при этом мощность $P_y = (1 \div 4) \text{ кВт}$ при $W_y = (100 \div 400) \text{ Дж}$. На рис. 5.29 представлены схемы магнитных систем ЛЭМД

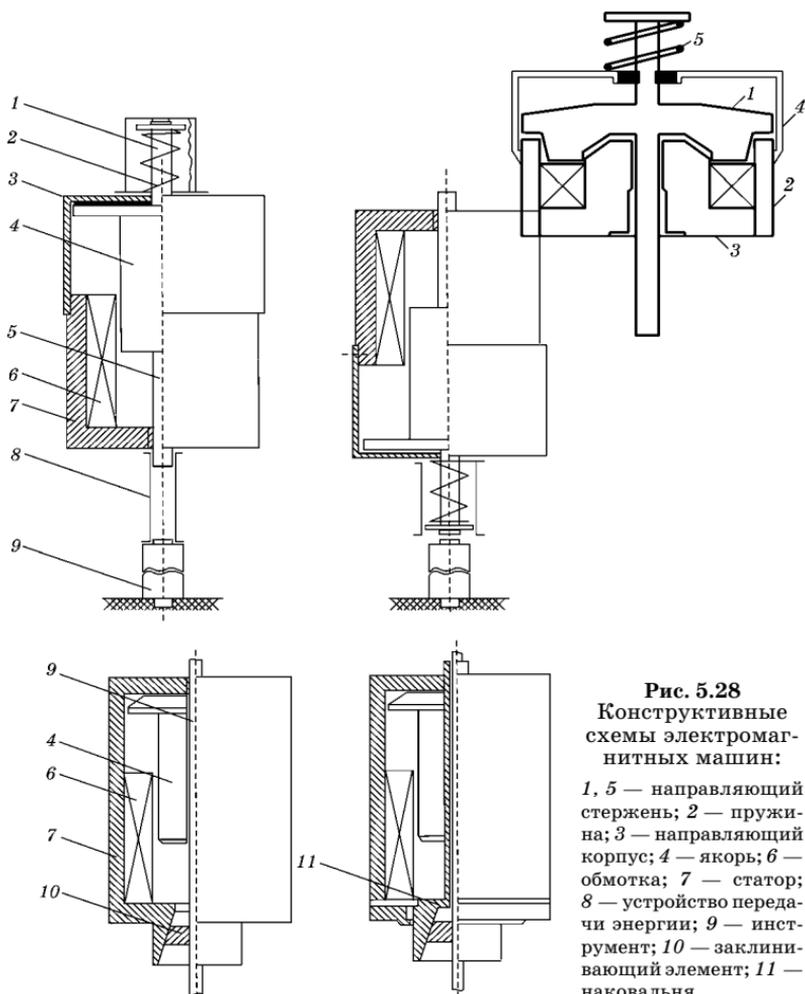


Рис. 5.28
Конструктивные
схемы электромагнитных
машин:

1, 5 — направляющий стержень; 2 — пружина; 3 — направляющий корпус; 4 — якорь; 6 — обмотка; 7 — статор; 8 — устройство передачи энергии; 9 — инструмент; 10 — заклинивающий элемент; 11 — наковальня.

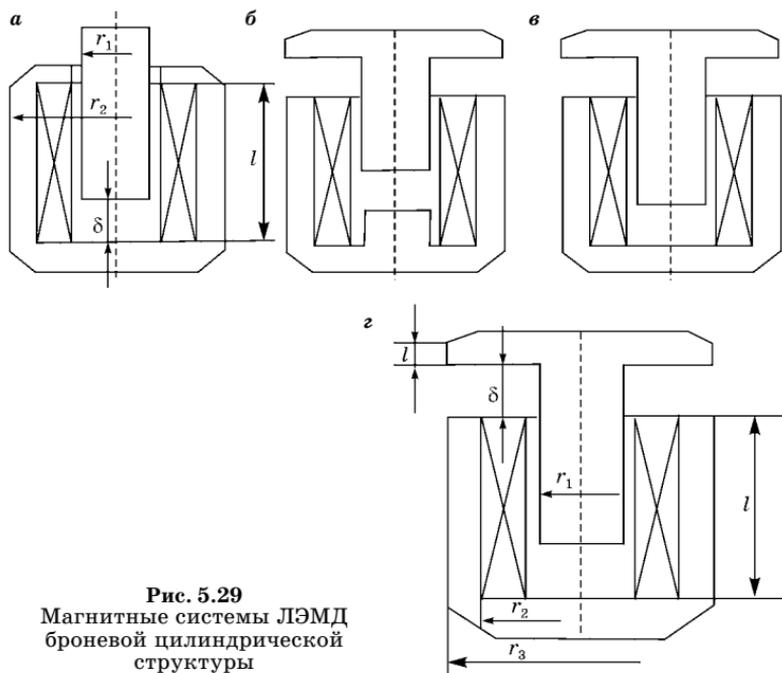


Рис. 5.29
Магнитные системы ЛЭМД
броневой цилиндрической
структуры

броневого типа. Работа, совершаемая электромагнитом, определяется через изменение потокосцепления ψ и тока i при перемещении якоря $W = \int_{i_1}^{i_2} i d\psi$ [6, 18], где ψ_1 и ψ_2 — начальное и конечное значение ψ соответственно при начальном и конечном зазорах δ (см. рис. 5.29). В этом смысле при одном и том же рабочем ходе якоря изменение потокосцепления обмотки ЛЭМД с несколькими зазорами (рис. 5.29б, в, з — два зазора) будет больше, чем у ЛЭМД с одним зазором. Очевидно, что реализация потенциальных возможностей ЛЭМД может быть достигнута при определенном соотношении геометрических размеров — $r_1, r_2, l, \delta_{\max}$ ($r_2/r_1, l/r_1, \delta_{\max}/l$). Это решается при разработке ЛЭМД как задача оптимизации по определенному критерию. В машинах ударного действия стараются максимально увеличить не только энергию W_y в момент удара, но и повысить быстродействие n_y , следовательно, и мощность $P_y = W_y n_y$. Значение n_y зависит от массы якоря, силовой характери-

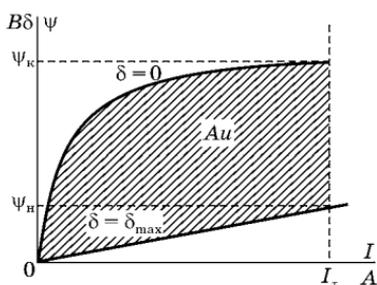


Рис. 5.30
Характеристики
намагничивания ЛЭМД
для двух положений якоря

стики электромагнита $F_{эм}(\delta)$. При этом масса якоря является определяющей величиной, зависящей от назначения машины. Цикл работы ЛЭМД состоит из интервалов времени: трогания $t_{тр}$, движения $t_{дв}$, возврата $t_{в}$, подобно электромагнитным аппаратам [36]. Для переносных ударных машин, как правило, используются цилиндрические винтовые возвратные пружины с жесткостью в соответствии с характеристикой $F_{эм}(\delta)$.

На рис. 5.30 изображены характеристики намагничивания для двух положений якоря: $\delta = \delta_{max}$ — линейная; $\delta = \delta_{кон} \approx 0$ — резко нелинейная, индукция в стали $B \cong 2$ Тл. Заштрихованная на рис. 5.30 область эквивалентна интегральной работе ЛЭМД на пути от $\delta_{max} = \delta_{нач}$ до $\delta_{min} = \delta_{кон}$.

Питание импульсного ЛЭМД во многих случаях осуществляется от автономного источника, что особенно актуально для сельского хозяйства. Обычно используются дизель-генераторы или аккумуляторные батареи. При этом энергозапас W , Дж, и мощность P , Вт, остаются соизмеримыми с мощностью потребителя в силу дискретности потребления энергии, что является положительным свойством ЛЭМД.

Основные требования к источникам питания [44, 57]:

1. Возможность работы в импульсном режиме, минимальное внутреннее сопротивление, высокая мощность питающих импульсов.
2. Компактность, малые габариты и масса, минимальное время подготовки к работе, удобство транспортировки, в том числе и ручная переноска.

Основные требования к источникам питания [44, 57]:

1. Возможность работы в импульсном режиме, минимальное внутреннее сопротивление, высокая мощность питающих импульсов.

2. Компактность, малые габариты и масса, минимальное время подготовки к работе, удобство транспортировки, в том числе и ручная переноска.

На практике используются дизель-генераторы мощностью до $10 \div 15$ кВт, при частоте $f = 50$ Гц и напряжении 220 В; аккумуляторные батареи емкостью до 600 А·ч, в зависимости от продолжительности работы; комбинированные источники питания. Отметим, что мощность ис-

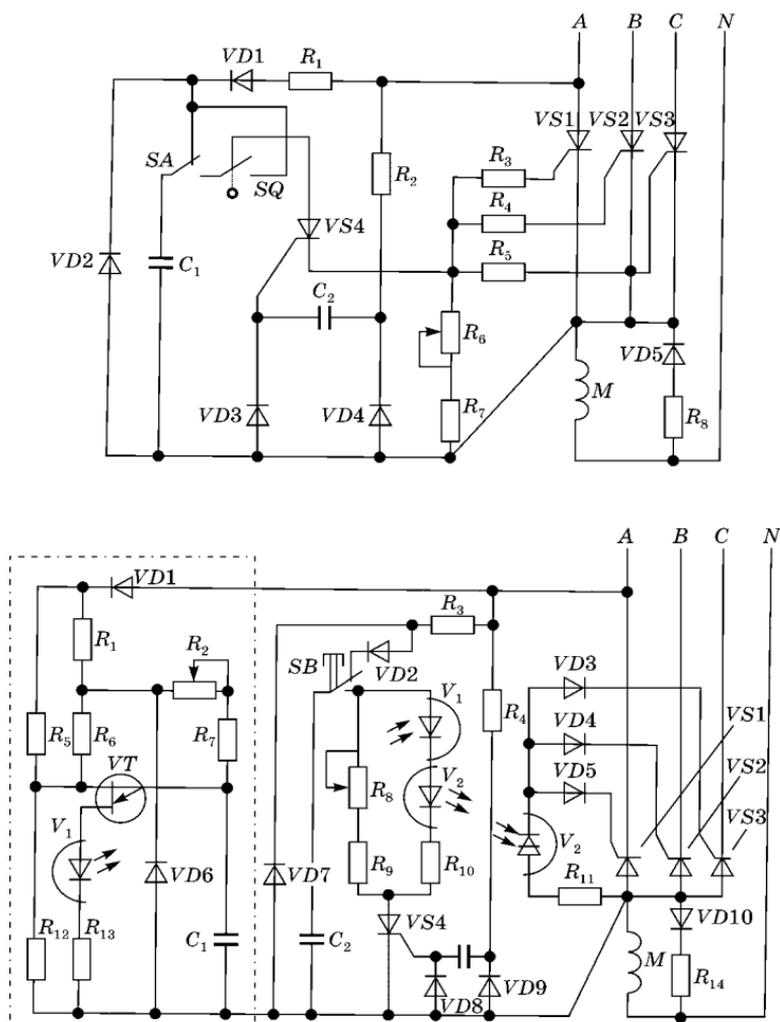


Рис. 5.31
Схемы ЭП для источников переменного тока

точника во многом определяет время трогания $t_{тр}$ и движения $t_{дв}$, а в итоге время срабатывания $t_{ср}$ и быстродействие n_v : чем выше мощность, тем больше n_v .

На рис. 5.31 изображены схемы импульсных преобразователей при питании от источника переменного тока [57]. Силовая часть преобразователя состоит из однополу-

периодного управляемого трехфазного выпрямителя на тиристорах VS1–VS3, рабочей обмотки электромагнита *M*, разрядных диода VD5 и резистора R8. Остальные элементы: стабилитроны VD2 и VD4, конденсаторы C1, C2, тиристор VS4, концевой выключатель SQ и резисторы R1–R7 относятся к управляющей части схемы, которые определяют длительность и частоту импульсов тока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите область применения синхронных двигателей малой, средней и большой мощности.
2. Каким образом регулируют коэффициент мощности синхронных машин?
3. Какие основные элементы (узлы) включает в себя вентильный двигатель?
4. Объясните принцип работы вентильного двигателя, его характеристики.
5. Каким образом достигается снижение пульсаций момента вентильного двигателя?
6. Назовите основной способ регулирования скорости вентильного двигателя.
7. Объясните устройство и принцип действия линейного асинхронного двигателя.
8. Перечислите области использования линейных асинхронных двигателей в сельском хозяйстве.
9. Объясните принцип действия линейных электромагнитных двигателей.
10. Расскажите о применении линейных электромагнитных двигателей в сельском хозяйстве.

6 ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Электрические приводы потребляют более 60% всей вырабатываемой в стране электроэнергии, поэтому расчет основных энергетических показателей приводов и определение способов их повышения имеет большое практическое значение с точки зрения энергосбережения. С другой стороны, потери в двигателе определяют температуру отдельных его частей, следовательно, и допустимый момент или мощность на валу.

К основным энергетическим показателям работы электроприводов относятся потери мощности ΔP , энергии ΔW , КПД и коэффициент мощности. В некоторых случаях работа электрических машин или приводов оценивается по энергетическому фактору ($\eta \cdot \cos \varphi$).

Следует отметить, что при работе электродвигателей от преобразователей энергии (УВ, ТРН, ПЧ) токи и напряжения на обмотках несинусоидальны, что приводит к росту потерь, реактивной мощности [3, 53]. В этих случаях под значениями токов и напряжений подразумеваются их первые гармонические.

Энергетические характеристики системы электропривода зависят от режима его работы, характера изменения момента нагрузки и способа регулирования координат — тока, момента, скорости. Эти показатели рассмотрены отдельно для нерегулируемого и регулируемого приводов в установившемся и динамических режимах. При этом динамические режимы ограничены рассмотрением условий пуска и торможения.

6.1. ЭНЕРГЕТИКА НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

В общем случае, мощность потерь в приводе ΔP складывается из потерь в электродвигателе и в механической передаче от вала двигателя к исполнительному органу рабочей машины. Механические потери, как правило, оцениваются с помощью КПД различного рода передач [5], поэтому здесь рассматриваются только потери в электродвигателе, которые условно делятся на постоянные ΔP_c (const, не зависящие от нагрузки) и переменные ΔP_v (var) [2, 3, 4, 53].

При этом

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_c + \Delta P_v. \quad (6.1)$$

Постоянные потери — это потери в стали машины и механические: трение в подшипниках, вентиляционные, а для ДПТ независимого возбуждения и синхронных двигателей — это и потери в обмотках возбуждения. Следовательно, условие $\Delta P_c = \text{const}$ предполагает высокую жесткость механической характеристики, т. е. $\omega \cong \text{const}$, $\Phi \delta \cong \text{const}$.

Переменные потери — это потери в цепях якорных обмоток ДПТ, СД, а в асинхронных двигателях — в обмотках статора и ротора.

Для двигателей постоянного тока $P \equiv I_a$, поэтому переменные потери в обмотках якоря

$$\Delta P_v = I_a^2 \cdot R_a = I_{\text{ан}}^2 R_a \left(\frac{I_a}{I_{\text{ан}}} \right)^2 = \Delta P_{\text{вн}} \left(\frac{I_a}{I_{\text{ан}}} \right)^2 = \Delta P_{\text{вн}} \mathcal{K}_{\text{н}}^2, \quad (6.2)$$

где $\Delta P_{\text{вн}} = I_{\text{ан}}^2 R_a$ — потери в номинальном режиме; R_a — сопротивление якорной цепи; $\mathcal{K}_{\text{н}} = \frac{P_2}{P_{2\text{н}}} = \frac{I_a}{I_{\text{ан}}}$ — коэффициент загрузки.

Для асинхронных двигателей потери в обмотках

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' = 3I_2'^2 \left(R_2' + \frac{R_1}{\sigma^2} \right) \cong \\ &\cong 3I_{2\text{н}}'^2 \left(R_2' + \frac{R_1}{\sigma^2} \right) \left(\frac{I_2'}{I_{2\text{н}}'} \right)^2 \cong \Delta P_{\text{вн}} \left(\frac{I_2'}{I_{2\text{н}}'} \right)^2, \end{aligned} \quad (6.3)$$

где $\sigma_{\text{н}} = \frac{I_{2\text{н}}}{I_{1\text{н}}} \approx (0,85 \div 0,95)$, $\sigma = \frac{I_2'}{I_1}$ — номинальная и текущая кратности приведенного тока ротора. Величина σ зависит от скольжения и тока холостого хода двигателя, $\sigma = (0,45 \div 0,95)$ [5, 10]. R_1 и R_2' — активные сопротивления фазы обмотки статора и приведенного ротора, причем полное сопротивление цепи ротора, включая и добавочное.

Для синхронного двигателя потери в обмотке статора

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1 = 3I_{1\text{н}}^2 R_1 \left(\frac{I_1}{I_{1\text{н}}} \right)^2 = \Delta P_{v\text{н}} \left(\frac{I_1}{I_{1\text{н}}} \right)^2. \quad (6.4)$$

Кратность токов в (6.2–6.4) обозначаем через x , переменные потери в двигателях определяются общим выражением

$$\Delta P_v = \Delta P_{v\text{н}} x^2. \quad (6.5)$$

Полные потери мощности

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_v = \Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{v\text{н}} x^2 = \Delta P_{v\text{н}} (a + x^2), \quad (6.6)$$

где $a = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{v\text{н}}}$ — коэффициент потерь, $a = (0,5 \div 1,5)$ [2, 3, 4].

При работе двигателей в номинальном режиме полные потери

$$\Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}} \frac{(1 - \eta_{\text{н}})}{\eta_{\text{н}}}. \quad (6.7)$$

Потери энергии за время работы t_p с постоянной нагрузкой

$$\Delta W = \Delta P t_p. \quad (6.8)$$

При работе двигателя с циклической нагрузкой потери энергии

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i, \quad (6.9)$$

где ΔP_i — потери в промежутке времени t_i ; $t_{\text{ц}}$ — продолжительность цикла.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}. \quad (6.10)$$

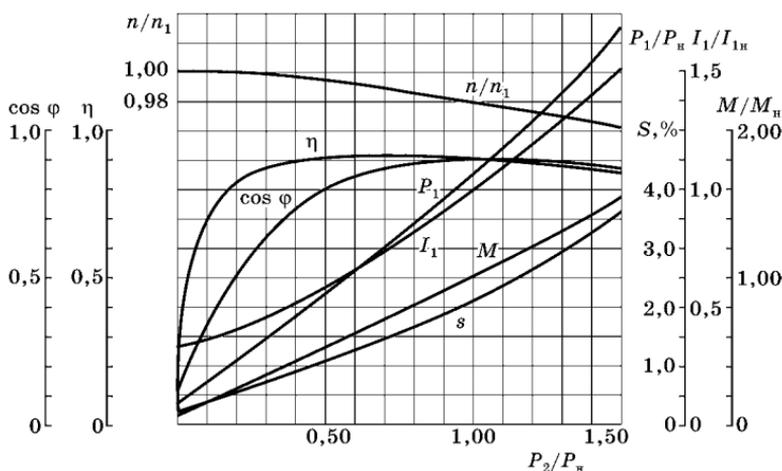


Рис. 6.1

Рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 50 кВт, 220/380 В, 50 Гц, 1470 об/мин в относительных единицах (за базовые приняты значения характеристик в номинальном режиме)

КПД двигателя зависит от его загрузки $K_n = \frac{P_2}{P_n}$ (рис. 6.1) [20] и достигает своего наибольшего значения при $\Delta P_c = \Delta P_o$. Поэтому для снижения потерь энергии следует обеспечивать близкую к номинальной загрузку и ограничивать время работы на холостом ходу, особенно для асинхронных двигателей с целью снижения потребляемой реактивной мощности.

При наличии мало загруженных двигателей иногда целесообразно произвести их замену на двигатели меньшей мощности, соответствующей реальной нагрузке. Практика показывает, что такая замена рациональна при $K_n = \frac{P_2}{P_n} \leq 0,45$ [3, 4].

Асинхронные двигатели потребляют из сети реактивную мощность (отстающий ток), вызывая тем самым дополнительные потери в цепи источник — линия — двигатель. Для этих машин КПД и коэффициент мощности зависят не только от загрузки, но и от числа полюсов, т. е. от синхронной скорости $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$ (рис. 6.2, 6.3) [24].

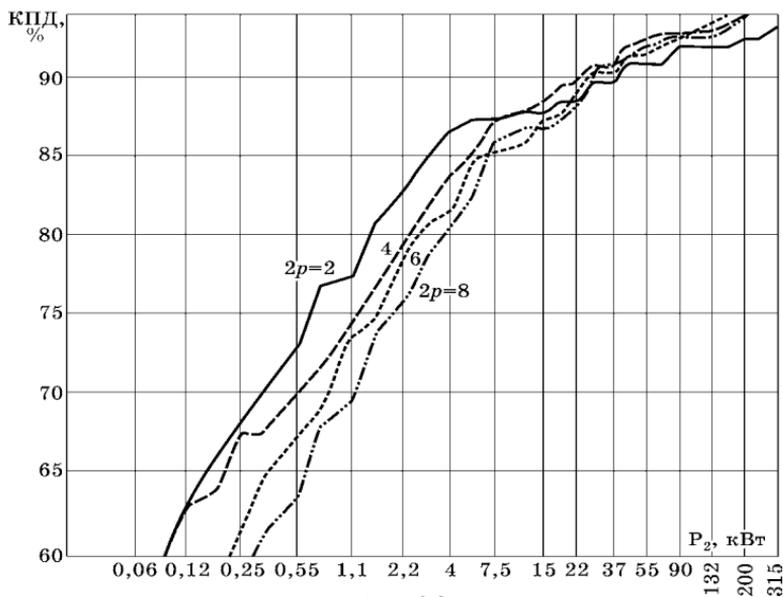


Рис. 6.2
Значения КПД асинхронных двигателей серии 4А

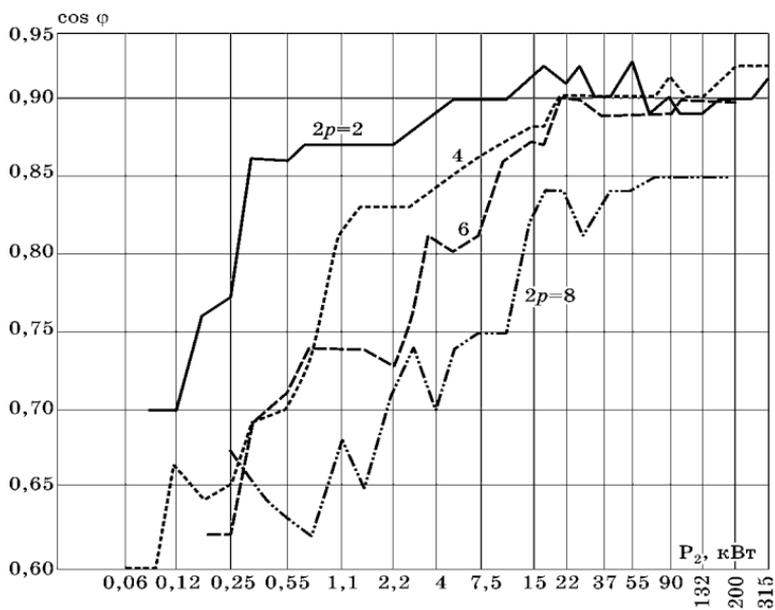


Рис. 6.3
Значения коэффициента мощности двигателей серии 4А

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q^2}}, \quad (6.11)$$

где P_1 — потребляемая из сети активная мощность, $P_1 = S \cos \varphi$; S — полная мощность, $S = 3U_\phi I_\phi$; Q — реактивная мощность, $Q = 3I_\mu^2 x_\mu + 3I_1^2 x_1 + 3I_2^2 x_2'$, где основная составляющая связана с намагничивающим током. $I_\mu \cong \text{const}$ при $U = \text{const}$, ток $I_\mu = (0,25 \div 0,7) I_{1н}$, в зависимости от мощности. При $\cos \varphi = (0,7 \div 0,9)$ двигатель на каждый киловатт (кВт) активной мощности потребляет $(0,5 \div 0,75)$ кВА реактивной. При снижении загрузки АД $\cos \varphi$ снижается (см. рис. 6.1), так как удельный вес реактивной мощности Q в (6.11) возрастает с уменьшением P_1 .

По сравнению с питанием постоянным током и условием равенства мощностей при переменном токе в системе протекала бы только активная составляющая тока $I_a = I_1 \cos \varphi$. Следовательно, потери в системе (источник, линия, потребитель) при заданной активной мощности P_1 рассчитываются по выражению [10]

$$\Delta P = I^2 R_\Sigma = \left(\frac{P_1}{U} \right)^2 R_\Sigma \frac{1}{\cos^2 \varphi} = \Delta P_{пт} \frac{1}{\cos^2 \varphi}, \quad (6.12)$$

где $\Delta P_{пт}$ — потери на постоянном токе; R_Σ — суммарное активное сопротивление цепи от источника до потребителя.

Видно, что в цепях переменного тока потери возрастают в $\frac{1}{\cos^2 \varphi}$ раз. Например, при $\cos \varphi = 0,8$ потери увеличиваются в 1,56 раза. Таким образом, $\cos \varphi$ определяет экономичность потребления активной мощности.

Для повышения $\cos \varphi$ и КПД следует соблюдать загрузку в пределах $(0,7 \div 1,0)$ от номинальной. В приводах, работающих с переменной нагрузкой, целесообразно понижать напряжение в интервалы недогрузок. При этом снижается реактивная мощность и повышается $\cos \varphi$. Реализуется снижение напряжения обычно с помощью тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) (см. главу 4). Следует отметить, что при регулировании напряжения изменением угла открытия вентилях кривые напряжения и тока двигателя несинусоидальны, потребляемая реактивная мощ-

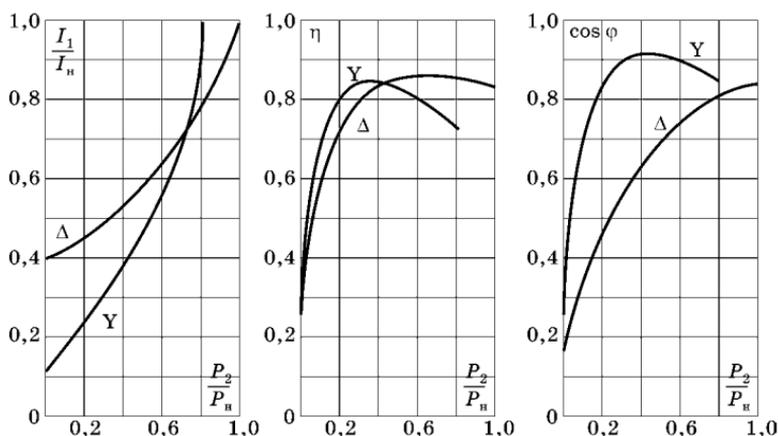


Рис. 6.4

Рабочие характеристики асинхронного двигателя мощностью 28 кВт при соединении обмоток статора в треугольник и в звезду при напряжении сети, равном номинальному фазному напряжению двигателя

ность больше мощности при синусоидальном напряжении, и эта разница увеличивается с ростом угла управления [3].

Снижение напряжения (ступенчато, в $\sqrt{3}$ раз) возможно и переключением обмоток статора с треугольника на звезду. При этом момент двигателя уменьшается в 3 раза, а экономичность такого приема ограничена значением нагрузки, ниже которой такое переключение целесообразно (рис. 6.4) [20].

В некоторых случаях рационально использовать статические устройства компенсации реактивной мощности, индивидуальные или групповые. Более эффективны устройства, регулируемые и работающие в автоматическом режиме, с переключением величины емкости в зависимости от $\cos \varphi$.

6.2. ЭНЕРГЕТИКА РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Определение энергетических показателей работы регулируемых электроприводов представляет собой более сложную задачу, чем нерегулируемых. Это связано:

- с изменением скорости и магнитного потока двигателя, следовательно, и постоянных потерь ΔP_c ;

- с наличием силового преобразователя (УВ, ШИП, ТРН, ПЧ), в котором также есть потери;
- с зависимостью энергетических показателей от способа регулирования.

В этом плане способы регулирования делятся на экономичные и неэкономичные. К экономичным способам относятся регулирование скорости ДПТ изменением напряжения и магнитного потока, частотное регулирование АД. Неэкономичные — реостатные для ДПТ и АД, изменением напряжения для АД.

Сложным в данном случае является определение потерь в силовом преобразователе. Если питание осуществляется от отдельного трансформатора, то постоянные и переменные потери в преобразователе — это потери в стали и меди обмоток трансформатора, в полупроводниковых приборах (тиристорах, диодах, транзисторах). Они определяются током и прямым падением напряжения ΔU , которое указывается в справочной литературе. В целом, потери в преобразователе могут быть оценены и с помощью усредненных значений КПД. Поэтому ниже приводится определение потерь только в двигателе.

Электропривод с двигателем постоянного тока. Вне зависимости от способа регулирования постоянные потери ΔP_c с достаточной точностью могут быть определены по формуле [3, 4]

$$\Delta P_c = \Delta P_{сн} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^{1,5}, \quad (6.13)$$

где $\Delta P_{сн}$ — постоянные потери номинального режима.

Переменные потери на искусственных характеристиках

$$\Delta P_v = I_a^2 \cdot R_{a\Sigma} = M(\omega_{0и} - \omega) = M \cdot \Delta\omega, \quad (6.14)$$

где $R_{a\Sigma}$ — полное сопротивление якорной цепи, включая добавочные сопротивления $R_{ад}$; M — электромагнитный момент двигателя, $M = C\Phi I_a$; $\omega_{0и}$ — скорость идеального холостого хода на искусственной характеристике; $\Delta\omega$ — перепад скорости (влияние нагрузки).

При регулировании скорости ДПТ изменением напряжения (Г-Д, УВ-Д, ШИП-Д) при $M_c = \text{const}$ ток якоря

остаётся неизменным, поэтому и переменные потери при этом $\Delta P_v = \text{const}$.

КПД двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{(M)} = \frac{M \cdot \omega}{M\omega + \Delta P_{\text{дв}}}, \quad (6.15)$$

где M — приведенный к валу момент сопротивления; ω — скорость двигателя.

Очевидно, что с уменьшением скорости и $\Delta P_{\text{дв}} \approx \text{const}$ КПД привода снижается.

Электропривод с асинхронным двигателем. Для АД постоянными являются механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$, потери в стали статора и ротора ΔP_{Fe} , а иногда и потери в обмотке статора от намагничивающего тока I_{μ} [10].

$$\Delta P_c = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{Fe}} + 3I_{\mu}^2 R_1. \quad (6.16)$$

Механические потери, как и для ДПТ, могут быть определены по (6.13)

Потери в стали пропорциональны квадрату индукции B^2 и частоте в степени 1,3 [21], но поток в зазоре пропорционален напряжению, поэтому

$$\Delta P_{\text{Fe}} \approx \Delta P_{\text{FeH}} \left(\frac{U}{U_H} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)^{1,3}. \quad (6.17)$$

Переменные потери при реостатном регулировании [10]

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_v &= \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} = \Delta P_{\text{эл1H}} [A + (1-A)M^{*2}] + M\omega_0 s \\ \text{или} \\ \Delta P_v &= \frac{M\omega_0 s R_1}{R_2} + M\omega_0 s \end{aligned} \right\}, \quad (6.18)$$

где $\Delta P_{\text{эл1H}}$ — потери в обмотке статора для номинального

режима; $A = \left(\frac{I_0}{I_{1H}} \right)^2$; $M^* = \frac{M}{M_H}$ — относительный момент;

M — момент двигателя, текущее значение; $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$; p — число пар полюсов; s — скольжение; I_0 — ток холостого хода.

Коэффициент полезного действия АД при реостатном регулировании

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M_c \cdot \omega}{M_c \cdot \omega + M_c \omega_0 s + \Delta P_{\text{эл1н}} [A + (1-A)M^{*2}] + \Delta P_{\text{Фен}}}, \quad (6.19)$$

где M_c — приведенный к валу двигателя момент сопротивления.

При этом зависимость КПД от скорости представляет собой прямую, наклон которой зависит от момента.

Коэффициент мощности может быть определен из схемы замещения, как

$$\cos \varphi = \frac{R_3}{Z_3} = \frac{R_3}{\sqrt{R_3^2 + X_3^2}}, \quad (6.20)$$

где R_3 , X_3 — эквивалентные активное и индуктивное сопротивления Г-образной схемы замещения.

Энергия, потребляемая из сети при работе с установившейся скоростью за время t_p , представляет собой сумму механической (полезной) энергии $W_{\text{мех}}$ и потерь ΔW :

$$\begin{aligned} W_1 &= W_{\text{мех}} + \Delta W = \\ &= t_p \{ M_c \cdot \omega_0 + \Delta P_{\text{эл1н}} [A + (1-A)M^{*2}] + \Delta P_{\text{Фен}} \}. \end{aligned} \quad (6.21)$$

Отметим, что $M_c \omega_0 = P_m$ — электромагнитная мощность двигателя, $P_m = P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{эл2}}$.

Электропривод «тиристорный регулятор напряжения — АД». Структура такого привода приведена в главе 4. Напряжение на зажимах АД регулируется изменением угла открытия тиристоров от $U_1 = U_{1н}$ до $U_1 = 0$, синхронная скорость ω_0 и критическое скольжение АДКЗР не изменяются, но регулируется момент двигателя, $M \equiv U^2$, изменяется, точнее, увеличивается рабочее скольжение. Кривые напряжений и токов содержат спектр нечетных гармоник, что дополнительно увеличивает потери в двигателе, возрастание которых можно учесть с помощью коэффициентов [10].

Потери в обмотках и в стали определяются по следующим выражениям [10]

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{\text{эл1}} = \Delta P_{\text{эл1н}} M_c^* \left[\frac{A \cdot s_{\text{н}}}{s} + \frac{(1-A)s}{s_{\text{н}}} \right] \\ \Delta P_{\text{эл2}} = \frac{\Delta P_{\text{эл2н}} M_c^* s}{s_{\text{н}}} \\ \Delta P_{\text{1Fe}} = \Delta P_{\text{Feн}} M_c^* \left[\frac{B s_{\text{н}}}{s} + \frac{(1-B)s}{s_{\text{н}}} \right] \end{array} \right., \quad (6.22)$$

где $B = (0,96 \div 0,98)$ — для двигателей единой серии [10]; $s_{\text{н}}$ — скольжение номинального режима; s — рабочее скольжение на искусственной характеристике.

КПД электропривода

$$\eta = \frac{M_c \omega}{M_c \omega + \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{Fe}}}. \quad (6.23)$$

В таких приводах с уменьшением напряжения увеличивается скольжение, относительные потери в роторе превышают те же в остальных элементах машины [10], так как $\Delta P_{\text{эл2}} = P_{\text{м}} s$. Поэтому мощность двигателя должна быть выбрана таким образом, чтобы во всем диапазоне пониженных скоростей потери в роторе были меньше номинальных — $\Delta P_{\text{эл2н}}$, т. е. необходимо соблюдать условие

$$\Delta P_{\text{эл2}} \leq \Delta P_{\text{эл2н}}, \quad (6.24)$$

из которого следует, что допустимый по нагреву относительный момент двигателя

$$M_{\text{доп}}^* = \frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{н}}} \cdot \frac{s_{\text{н}}}{s}. \quad (6.25)$$

Можно сказать, что электроприводы по системе ТРН–АД имеют низкую энергетическую эффективность. Однако существует ряд устройств, где для выполнения технологических требований целесообразно их использовать: маломощные вентиляторы ферм, насосы, работающие с переменным расходом, другие механизмы с вентиляторной механической характеристикой [5, 11].

Электропривод по системе «преобразователь частоты — АД». Частотный способ регулирования скорости асинхронных двигателей является самым экономичным

по сравнению с другими (см. главу 4). Экономичность преобразования энергии в системе ПЧ–АД определяется общим КПД электропривода

$$\eta_{\text{эп}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P} = \eta_{\text{пч}} \eta_{\text{дв}}, \quad (6.26)$$

где $P_{\text{мех}}$ — механическая мощность АД, $P_{\text{мех}} = P_2 + \Delta P_{\text{мех}}$; P — потребляемая из сети мощность; $\eta_{\text{пч}}$ — КПД преобразователя; $\eta_{\text{дв}}$ — КПД двигателя.

$$\eta_{\text{пч}} = \frac{P_1}{P} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{пч}}}{P_1 + \Delta P_{\text{пч}}}; \quad \eta_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{дв}}}{P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{дв}}}. \quad (6.27)$$

Здесь P_1 — мощность, потребляемая двигателем от преобразователя; $\Delta P_{\text{пч}}$, $\Delta P_{\text{дв}}$ — потери в преобразователе и двигателе соответственно.

Потери в преобразователе складываются из составляющих:

- потери в вентилях выпрямителя и автономного инвертора напряжения (АИН);
- потери в дросселях, фильтрах электромагнитной совместимости на входе выпрямителя и выходе ПЧ;
- потери в конденсаторах звена постоянного тока и выходного фильтра.

Основную долю полных потерь мощности в ПЧ составляют электрические потери в вентилях выпрямителя, АИН и дросселях.

Точный расчет потерь в ПЧ представляет собой сложную задачу, поэтому можно ограничиться усредненными значениями КПД $\eta_{\text{пч}} = (0,95 \div 0,98)$ [10].

При частотном способе управления потери в двигателе

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{мех}}. \quad (6.28)$$

Составляющие потерь в обмотках

$$\Delta P_{\text{эл1}} = \Delta P_{\text{эл1н}} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1н}} \right)^2; \quad \Delta P_{\text{эл2}} = \Delta P_{\text{эл2н}} \cdot \left(\frac{I'_2}{I'_{2н}} \right)^2. \quad (6.29)$$

Потери в стали статора могут быть определены по (6.17), механические потери — по (6.13).

В заключение отметим, что каждая из составляющих потерь зависит от режима работы двигателя, отношения $\frac{U_1}{f_1}$, т. е. от закона регулирования (см. главу 4). Напрямер при $M_c = M_n = \text{const}$, $f_2 = \text{const}$ полные переменные потери

$$\Delta P_v = M_n \omega_0 s_n \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = \text{const}. \quad (6.30)$$

6.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Динамические режимы (или переходные процессы) связаны с процессами накопления и отдачи энергии — электромагнитной, механической, тепловой. На протекание переходных процессов оказывают влияние различные виды инерции:

1) электромагнитная — обусловлена энергией магнитного поля, связанной с обмотками машин и аппаратов,

$$W_{\text{эм}} = L_1 \left(\frac{i_1^2}{2} \right) + L_2 \left(\frac{i_2^2}{2} \right) + M_{1,2} i_1 i_2; \quad (6.31)$$

2) механическая — связана с кинетической энергией вращающихся и движущихся поступательно масс,

$$W_k = J \left(\frac{\omega^2}{2} \right); \quad W_k = \frac{mv^2}{2}; \quad (6.32)$$

3) тепловая — связана с накоплением и распространением (передачей) тепловой энергии.

Степень влияния инерционности того или иного вида характеризуется соответствующими постоянными времени, определяющими скорость протекания переходных процессов.

Электромагнитная постоянная времени $T_s = \frac{L}{R}$, где L и R — индуктивность и активное сопротивление обмотки.

Электромеханическая постоянная времени

$$T_m = \left(\frac{JR}{(C\Phi)^2} \right) = \left(\frac{J\omega_0}{M_{\text{кз}}} \right) \text{ (см. ниже)}. \quad (6.33)$$

Постоянная времени нагрева $T_H = \frac{C}{A}$, где $C = ct$ — теплоемкость, $A = \alpha S$ — теплоотдача с поверхности.

Тепловые процессы протекают значительно медленнее электромагнитных и механических, поэтому рассматриваются отдельно. Электромагнитные процессы по сравнению с механическими являются быстрыми ($T_\varepsilon \ll T_M$), поэтому во многих случаях рассматриваются только механические переходные режимы (электромеханические).

Из возможных динамических режимов здесь анализируются пуск, торможение и реверс электроприводов [3, 4, 5].

Процесс пуска ДПТ независимого возбуждения в одну ступень описывается уравнениями электрического и механического равновесия.

$$\left. \begin{aligned} U &= C\Phi\omega + i(t)R \\ M &= C\Phi i(t) = M_c + J\left(\frac{d\omega}{dt}\right) \end{aligned} \right\}$$

или

$$\left. \begin{aligned} U &= c\omega + i(t) \cdot R \\ M &= ci(t) = M_c + J\left(\frac{d\omega}{dt}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (6.34)$$

где $c = C\Phi$ при $\Phi = \text{const}$; $U = \text{const}$ — напряжение сети; $R = R_a + R_{ад}$ — полное сопротивление якорной цепи.

Решение для угловой скорости $\omega(t)$ [3, 4]

$$\omega(t) = \omega_c + (\omega_{нач} - \omega_c) e^{-\frac{t}{T_M}}, \quad (6.35)$$

где ω_c — установившееся значение скорости при моменте

сопротивления M_c ; $T_M = \left(\frac{JR}{(c\Phi)^2}\right) = \left(\frac{J\omega_0}{M_{кз}}\right)$ — электромеха-

ническая постоянная времени; $M_{кз}$ — момент ДПТ при КЗ (и введенном сопротивлении в якорную цепь), $M_{кз} = C\Phi I_{кз}$;

$I_{кз} \leq 3I_{ан}$; $\omega_0 = \frac{U}{C\Phi}$ — скорость идеального холостого хода;

$\omega_{нач}$ — начальное значение скорости.

Электромеханическая постоянная времени — это время, в течение которого привод с моментом инерции J раз-

гоняется без нагрузки из неподвижного состояния до скорости идеального холостого хода ω_0 при неизменном моменте, равном моменту короткого замыкания (пусковому). Постоянная T_m не зависит от нагрузки, но зависит от $M_{кз}$, т. е. тока I_a . С увеличением R увеличивается и постоянная времени, так как уменьшается $M_{кз}$.

Если пуск совершается под нагрузкой из состояния покоя ($\omega_{нач} = 0$), то

$$\omega = \omega_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right). \quad (6.36)$$

При пуске без нагрузки, $\omega_c \approx \omega_0$

$$\omega = \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right). \quad (6.37)$$

На рис. 6.5 представлены кривые $\omega(t)$, $i(t)$ при пуске в одну и несколько ступеней, под нагрузкой и без нагрузки. Процесс пуска практически заканчивается при $t = (3 \div 4)T_m$, так как скорость в этом случае отличается от ω_0 (или ω_c) на $(5 \div 2)\%$. Отрезок AB на рис. 6.5б равен перепаду скорости от действия нагрузки, $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_c$. Если бы пуск совершался при неизменном значении момента $M_{кз}$, скорость изменялась бы линейно, по прямым OA и OB .

При пуске в несколько ступеней (рис. 6.5в) ток колеблется от I_1 до I_2 из-за выключения ступеней пускового релостата. При выведении $R_{ад}$ уменьшается и электромеханическая постоянная времени, что приводит к тому, что время работы на ступенях различно, $t_{x1} > t_{x2} > t_{x3}$.

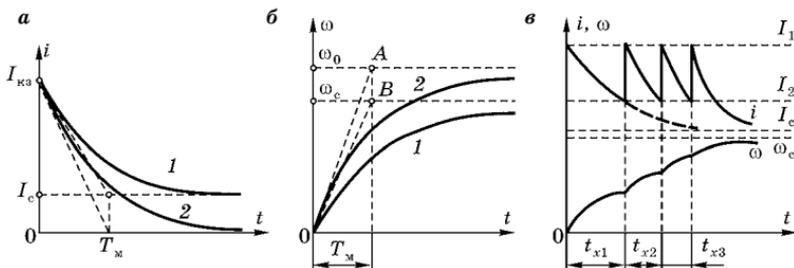


Рис. 6.5

Кривые $i(t)$ (а), $\omega(t)$ (б) при пуске ДПТ независимого возбуждения в одну ступень; график $i(t)$ и $\omega(t)$ при пуске в несколько ступеней (в):

1 — пуск под нагрузкой; 2 — пуск вхолостую.

Ток в обмотке якоря при пуске под нагрузкой из неподвижного состояния

$$i(t) = (I_{\text{кз}} - I_{\text{ac}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}} + I_{\text{ac}}, \quad (6.38)$$

где I_{ac} — установившееся значение тока; $I_{\text{кз}} = \frac{U}{R}$ — ток короткого замыкания при $\omega = 0$; $R = R_{\text{а}} + R_{\text{ад}}$.

При пуске без нагрузки, когда $I_{\text{ac}} \approx 0$,

$$i(t) = I_{\text{кз}} e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}} = I_{\text{кз}} e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}}. \quad (6.39)$$

Торможение противовключением осуществляется изменением полярности напряжения на выводах обмотки якоря, причем для ограничения тока вводится дополнительно резистор $R_{\text{ад}}$. График перехода из двигательного режима в режим противовключения показан на рис. 6.6. Торможение происходит по характеристике $M_{\text{нач}} O_1$. Если двигатель в точке O_1 не отключить, то он, развивая момент $M > M_{\text{с}}$, разгонится в противоположном направлении до скорости $\omega_{\text{уст}}$ (рис. 6.6б). Процесс торможения и последующего разгона в обратном направлении до скорости $\omega_{\text{уст}}$ называется реверсированием. Значения $M_{\text{нач}}$, $I_{\text{нач}}$ определяются сопротивлением якорной цепи.

При динамическом торможении уравнения равновесия

$$\begin{cases} C\Phi\omega + i(t)R = 0 \\ C\Phi i(t) = J \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{с}}, \end{cases} \quad (6.40)$$

где $R = R_{\text{а}} + R_{\text{ад}}$ — полное сопротивление цепи якоря.

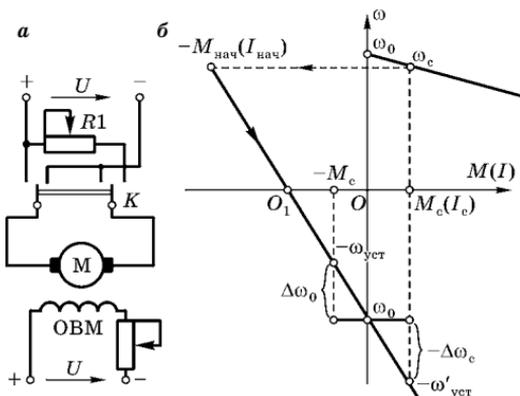


Рис. 6.6

Схема (а) и механические характеристики (б) ДПТ независимого возбуждения при переходе из двигательного режима в режим противовключения

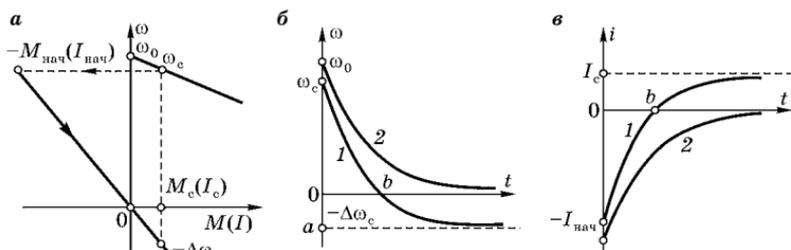


Рис. 6.7

Механические характеристики ДПТ независимого возбуждения при переходе из двигательного режима в режим динамического торможения (а); кривые $\omega(t)$ и $i(t)$ при динамическом торможении (б, в)

Решение для скорости при торможении с нагрузкой

$$\omega(t) = -\Delta\omega_c + (\omega_{\text{нач}} + \Delta\omega_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M} a}, \quad (6.41)$$

где $\Delta\omega_c = \frac{M_c R}{(C\Phi)^2}$ — абсолютное значение перепада скорости по характеристике динамического торможения при моменте нагрузки M_c (рис. 6.7а).

При динамическом торможении без нагрузки, $M_c = 0$, $\Delta\omega_c = 0$ и $\omega_{\text{нач}} = \omega_0$

$$\omega(t) = \omega_0 e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (6.42)$$

Переход из двигательного режима в режим динамического торможения показан на рис. 6.7а, а зависимости $\omega(t)$, $i(t)$ — на рис. 6.7б. Значение $\omega_{\text{нач}} = \omega_c$ (рис. 6.7а), вершины $M_{\text{нач}}$ и $I_{\text{нач}}$ определяются сопротивлением резистора, на который замыкается обмотка якоря, при $\Phi = \text{const}$ (см. главу 3).

В двигателе последовательного возбуждения магнитный поток и момент нелинейно изменяются в зависимости от тока якоря. Поэтому переходные характеристики имеют более сложный вид. На рис. 6.8

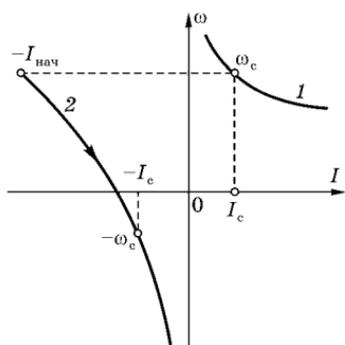


Рис. 6.8

Электромеханическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения при реверсировании: 1 — естественная характеристика двигателя; 2 — характеристика в режиме противовключения.

приведены характеристики $\omega(I_a)$ при реверсировании двигателя. Динамическое торможение часто осуществляется по схеме двигателя независимого возбуждения, поэтому справедливы выражения (6.40–6.42).

6.3.1. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Ранее (см. 6.1, 6.2) приведен расчет потерь электроприводов в установившихся режимах, когда $M_c = \text{const}$, $I_a = \text{const}$, $\omega = \text{const}$.

В переходных режимах целесообразно определять не среднее значение потерь мощности, а расход и потери энергии за время переходного процесса, так как здесь $I \neq \text{const}$, $\omega \neq \text{const}$.

В общем случае потери энергии в двигателе за время переходного процесса $t_{\text{пн}}$ [2, 3, 4]

$$\Delta W_{\text{пн}} = \int_0^{t_{\text{пн}}} (\Delta P_c + \Delta P_v)(t) dt. \quad (6.43)$$

Динамические режимы, как правило, характеризуются повышенными значениями тока, поэтому постоянные потери ΔP_c в силу их малости по сравнению с переменными ΔP_v можно не учитывать.

Для ДПТ независимого возбуждения потери при пуске

$$\Delta W_{\text{п}} = \int_0^{t_{\text{п}}} M(V) dt, \quad (6.44)$$

где $\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{C\Phi}$ — скорость идеального холостого хода.

При пуске вхолостую при $M_c = 0$ из уравнения движения

$$M = M_{\text{дин}} = \frac{Jd\omega}{dt}, \quad dt = \frac{Jd\omega}{M_{\text{дин}}},$$

тогда из (6.44) при $\omega_{\text{нач}} = 0$

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{по}} &= \int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega_0} J(\omega_0 - \omega) d\omega = \\ &= \int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega_0} J\omega_0 d\omega - \int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega_0} J\omega d\omega = \frac{J(\omega_0^2 - \omega_{\text{нач}}^2)}{2} = \frac{J\omega_0^2}{2}. \end{aligned} \quad (6.45)$$

Видно, что потери энергии при пуске двигателя вхолостую определяются запасом кинетической энергии вращающихся масс, накопленной к концу пуска. При этом $\Delta W_{\text{по}}$ не зависит от того, вводится пусковое сопротивление в якорную цепь или нет. Основное здесь — напряжение сети при пуске $U = \text{const}$.

Полезная работа при пуске вхолостую также равна запасу кинетической энергии

$$\Delta W_{\text{пол}} = \frac{J\omega_0^2}{2}. \quad (6.46)$$

Суммарная энергия, потребляемая из сети

$$W_{\text{эл}} = W_{\text{по}} + W_{\text{пол}} = J\omega_0^2. \quad (6.47)$$

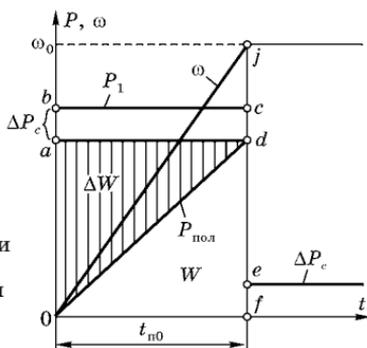


Рис. 6.9
Идеализированные графики $\omega(t)$, $P_1(t)$ и $P_{\text{пол}}(t)$ ДПТ независимого возбуждения при пуске вхолостую

На рис. 6.9 приведены идеализированные графики полезной и потребляемой мощности. Потребляемая из сети энергия изображается прямоугольником $Obcf$, а полезная мощность растет по прямой Od (скорость растет линейно, Oj). При этом не учитываются постоянные потери ΔP_c (отрезки ab , cd , ef). По окончании пуска (время $t_{\text{по}}$) полезная мощность падает до нуля ($M_c = 0$). Энергия, потребляемая цепью якоря, пропорциональна площади $Oadf$, потери в якорной цепи — площади треугольника Oad , а полная энергия W_2 — Odf .

При пуске под нагрузкой и $M_c = \text{const}$, $\omega_{\text{нач}} = 0$ потери энергии

$$\Delta W_{\text{п}} = \int_0^{t_{\text{п}}} M(\omega_0 - \omega) dt = \int_0^{t_{\text{п}}} (M_c + M_{\text{дин}})(\omega_0 - \omega) dt. \quad (6.48)$$

Подставив в (6.48) $dt = J \frac{d\omega}{M_{\text{дин}}}$, получим

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{п}} &= \int_0^{\omega_c} J(\omega_0 - \omega)d\omega + M_c \int_0^{t_{\text{п}}} (\omega_0 - \omega)dt = \\ &= J \left(\omega_0 \cdot \omega_c - \frac{\omega_c^2}{2} \right) + M_c \left(\omega_0 t_{\text{п}} - \int_0^{t_{\text{п}}} \omega dt \right), \end{aligned} \quad (6.49)$$

где ω_c — установившееся значение скорости при моменте M_c .

Первый член в (6.49) представляет потери энергии в якорной цепи, вызванные разгоном инерционных масс, подобно (6.45), а второй — потери, обусловленные наличием момента нагрузки M_c . Таким образом, потери энергии

$$\Delta W_{\text{п}} = \Delta W_{\text{п дин}} + \Delta W_{\text{пс}}. \quad (6.50)$$

Если считать, что $\omega_c \approx \omega_0$ (жесткая характеристика), то

$$\Delta W_{\text{п дин}} = \frac{J\omega_0^2}{2}, \quad \Delta W_{\text{пс}} = M_c \left(\omega_0 t_{\text{п}} - \int_0^{t_{\text{п}}} \omega dt \right). \quad (6.51)$$

Интеграл в (6.51) есть не что иное, как путь, проходимый приводом за время $t_{\text{п}}$. При равноускоренном движении

$$\int_0^{t_{\text{п}}} \omega dt = \frac{\omega_c t_{\text{п}}}{2},$$

тогда потери энергии будут

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{J\omega_c^2}{2} + M_c \omega_c \frac{t_{\text{п}}}{2}. \quad (6.52)$$

При торможении противовключением вхолостую потери в якорной цепи

$$\Delta W_{\text{т0}} = \int_{\omega_0}^0 J(-\omega_0 - \omega)d\omega = \int_0^{\omega_0} J(\omega_0 + \omega)d\omega = \frac{3J\omega_0^2}{2}. \quad (6.53)$$

При этом энергия поступает с вала двигателя (механическая) и из сети при $U_c = \text{const}$ (электрическая), сумма этих составляющих и определяет тройной запас кинетической энергии.

При торможении противовключением под нагрузкой ($M_c = \text{const}$), подобно (6.49), но при соответствующих знаках и $\omega_c \approx \omega_0$

$$\Delta W_{\text{тп}} = \frac{3J\omega_0^2}{2} - M_c \left(\omega_0 t_r + \int_0^{t_r} \omega dt \right). \quad (6.54)$$

Здесь также можно получить выражение типа (6.52) при $\varepsilon = \text{const}$.

Видно, что потери энергии при торможении двигателя под нагрузкой меньше, чем вхолостую (знак «-» перед второй составляющей).

При динамическом торможении ДПТ кинетическая энергия преобразуется в электрическую и выделяется в якорной цепи (обмотка и резистор) в виде теплоты.

Торможение вхолостую, как и при пуске

$$\Delta W_{\text{т0}} = \frac{J\omega_0^2}{2}. \quad (6.55)$$

При торможении под нагрузкой ($M_c = \text{const}$)

$$\Delta W_{\text{тп}} = \frac{J\omega_0^2}{2} - M_c \int_0^{t_r} \omega dt. \quad (6.56)$$

Потери энергии при реверсировании без нагрузки равны сумме потерь при торможении противовключением (6.53) и пуске (3.45)

$$\Delta W_{\text{р0}} = \int_{\omega_0}^{-\omega_0} J(-\omega_0 - \omega) d\omega = \frac{4J\omega_0^2}{2}. \quad (6.57)$$

При реверсировании под нагрузкой потери равны сумме потерь по (6.44) и (6.49)

$$\Delta W_{\text{р}} = \Delta W_{\text{п}} + \Delta W_{\text{тп}}. \quad (6.58)$$

Особо отметим, что при пуске вхолостую и $U_c = \text{const}$ и торможении ДПТ независимого возбуждения потери в якорной цепи не зависят от значения тока якоря, числа пусковых ступеней, электромагнитного момента и времени пуска (торможения).

Пример 6.1. Пригородный электропоезд массой 300 т (10 вагонов по 30 т) разгоняется при $U_a = \text{const}$ до выхода на естественную характеристику — скорость $v = 36 \text{ км/ч} = 10 \text{ м/с}$. Определить потери энергии при пуске и динамическом торможении.

Потери энергии при пуске

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{mv^2}{2} = 300 \cdot 10^3 \frac{10^2}{2} = 15 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 4,02 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

При суточной работе в течение 18 часов и пусках каждые 7,5 минуты (144 пуска)

$$\Delta W_{\text{п}\Sigma} = \Delta W_{\text{п}} \cdot 144 = 576 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Не трудно видеть, сколько энергии теряется в масштабах города и всей страны.

При динамическом торможении потери будут такими же, как и при пуске, $\Delta W_{\text{т}\Sigma} = 576 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$

6.4. ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Общность процессов электромеханического преобразования энергии в электрических машинах [17, 18] во многом определяет единство подходов и приемов при рассмотрении не только установившихся режимов электроприводов, но и переходных процессов. Однако при использовании асинхронных электроприводов есть ряд важных особенностей по сравнению с приводами постоянного тока [2, 3, 4, 10].

1. В АД электромагнитные переходные процессы оказывают большее влияние на электромеханические. Поэтому динамическая механическая характеристика во многом не совпадает со статической, рассчитанной по параметрам обмотки на основе схем замещения (рис. 6.10). При наличии момента нагрузки и больших инерционных масс двигатель относительно долго работает при низких скоростях, когда электромагнитные процессы затухают медленно. Следовательно, вид динамической характеристики определяется не только параметрами обмоток, но и моментом нагрузки, моментом инерции и видом самого переходного процесса (пуск, торможение, реверс).

2. Динамическими режимами АД с фазным ротором можно управлять введением сопротивлений в цепь ротора, подобно ДПТ с резисторами в якорной цепи.

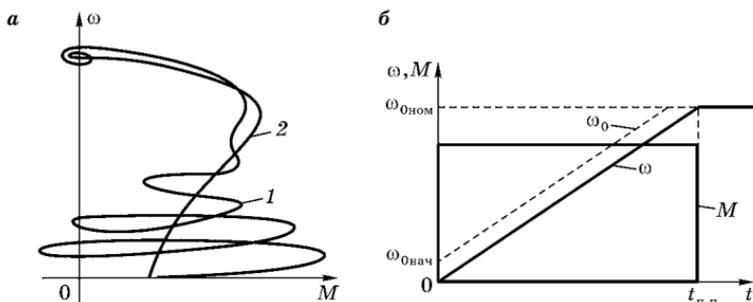


Рис. 6.10
Характеристики АД:

a — статическая (2) и динамическая (1) механические характеристики; *b* — переходные характеристики при частотном пуске АД холостую.

3. Двигатели с короткозамкнутым ротором запускают, как правило, прямым включением в сеть. При этом пусковой момент $M_{\text{п}} = (1 \div 2)M_{\text{н}}$, пусковой ток $I_{\text{п}} = (4,5 \div 7)I_{\text{н}}$.

4. Механическая характеристика $\omega(M)$ имеет нелинейный характер (см. главу 4), электромагнитный момент изменяется от $M_{\text{кз}} = M_{\text{п}}$ до M_m при ω_m , затем уменьшается до $M_{\text{н}}$ при $\omega_{\text{н}}$ или $M = M_{\text{хх}}$ при $\omega \approx \omega_0$.

Механические переходные процессы в асинхронном электроприводе описываются основным уравнением движения (см. главу 2).

$$M(s) - M_c(\omega) = \frac{Jd\omega}{dt}, \quad (6.59)$$

где $M(s)$ и $M_c(\omega)$ — механические характеристики (статические) двигателя и рабочей машины.

При допущении $M_c = \text{const}$, учитывая приближенную зависимость $M(s)$ (упрощенную формулу Клосса), уравнение (6.59) может быть решено аналитически.

При этом $\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega_0 ds}{dt}$, и можно записать

$$\frac{2M_m}{\frac{s_{\text{к}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{к}}}} - M_c = -\frac{J\omega_0 ds}{dt}. \quad (6.60)$$

Решение для $s(t)$, $\omega(t)$ и $M(t)$ из (6.60) достаточно сложное [3, 4], поэтому ниже приводится только оценка переходных процессов для холостого хода, т. е. при $M_c = 0$.

Из (6.60) при $M_c = 0$ следует

$$\begin{cases} dt = -\frac{T_M}{2} \left(\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K} \right) ds; \\ t_{\text{пп}0} = \frac{T_M}{2} \int_{s_{\text{кон}}}^{s_{\text{нач}}} \left(\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K} \right). \end{cases} \quad (6.61)$$

где $T_M = \frac{J\omega_0}{M_m}$ — электромеханическая постоянная времени; $s_{\text{нач}}$, $s_{\text{кон}}$ — начальное и конечное значения скольжения; $t_{\text{пп}0}$ — время переходного процесса при $M_c = 0$.

Для режима пуска $s_{\text{нач}} = 1$, $s_{\text{кон}} \approx 0,05$, время переходного процесса равно времени пуска

$$t_{\text{п}0} = \frac{T_M}{2} \left[\frac{s_K \ln 20 + (1 - 0,05^2)}{2s_K} \right] \approx T_M \left(1,5s_K + \frac{s_K}{4} \right). \quad (6.62)$$

Видно, что время пуска зависит от характера механической характеристики, т. е. значения s_K . При $s_K = 0,408$ время пуска минимально — $t_{\text{п}0} = 1,22T_M$, так как при этом средний момент $M_{\text{ср}}$, определяемый площадью, ограниченной характеристикой $M(s)$ и осью s , имеет наибольшее значение.

Торможение противовключением, $s_{\text{нач}} = 2$, $s_{\text{кон}} = 1$

$$t_{\text{т}0} = T_M \left(0,35s_K + \frac{3}{4}s_K \right). \quad (6.63)$$

При динамическом торможении $s_{\text{нач}} = 1$, $s_{\text{кон}} \approx 0,05$, поэтому справедлива формула (6.63)

6.4.1. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Общее выражение (6.43) для определения потерь энергии остается в силе, как и учет только переменных потерь ΔP_v .

Составляющая потерь энергии ΔW_v может быть найдена через электрические величины — токи и сопротивление статора и ротора — как

$$\Delta W_v = 3 \int_0^{t_{\text{пп}}} i_1^2(t) R_1 dt + 3 \int_0^{t_{\text{пп}}} i_2'^2(t) R_2' dt. \quad (6.64)$$

Сложность расчета потерь энергии по (6.64) заключается в том, что необходимо знать принципы изменения токов i_1 и i_2 в переходном процессе. Кроме того, сопротивление короткозамкнутой обмотки R_2' за время пуска и торможения не остается постоянным из-за поверхностного эффекта ($f_2 = \text{var}$). Поэтому здесь, как и ранее, переменные потери выражаются через механические величины — момент и скорость.

При пуске асинхронного двигателя вхолостую ($M_c = 0$) потери энергии в цепи ротора (без вывода), подобно двигателю постоянного тока (6.45)

$$\Delta W_{п20} = \frac{J(\omega_0^2 - \omega_{\text{нач}}^2)}{2} = \frac{J\omega_0^2}{2}(s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2), \quad (6.65)$$

где индексы: п — пуск; 2 — цепь ротора; $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$ — скорость идеального холостого хода; $\omega_{\text{нач}}$ — начальная скорость.

При $\omega_{\text{нач}} = 0$, $s_{\text{нач}} = 1$, $s_{\text{кон}} \approx 0$

$$\Delta W_{п20} = J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (6.66)$$

При торможении противовключением $\omega_{\text{нач}} = \omega_0$, $\omega_{\text{кон}} = 0$ ($s_{\text{нач}} = 2$, $s_{\text{кон}} = 1$)

$$\Delta W_{т2п} = \frac{3J\omega_0^2}{2}. \quad (6.67)$$

При реверсе $\omega_{\text{нач}} = -\omega_0$, $\omega_{\text{кон}} = \omega_0$ или $s_{\text{нач}} = 2$, $s_{\text{кон}} = 0$

$$\Delta W_{п20} = \frac{4J\omega_0^2}{2}. \quad (6.68)$$

Потери энергии в цепи обмотки статора в общем виде

$$\Delta P_{1v_0} = 3I_1^2 R_1 \approx \frac{\Delta P_2 \cdot R_1}{R_2}; \quad \Delta W_{1v_0} \approx \frac{\Delta W_{2v_0} \cdot R_1}{R_2'}. \quad (6.69)$$

Полные потери энергии

$$\Delta W_{v_0} = \Delta W_{1v_0} + \Delta W_{2v_0} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2). \quad (6.70)$$

Отметим, что здесь, так же как и в ДПТ, потери в обмотке ротора не зависят от сопротивления R_2' , времени пуска, зависимости $M(s)$ при пуске.

При пуске и торможении под нагрузкой справедливы-ми остаются формулы (6.49÷6.56) для двигателей постоянного тока. Подставив в (6.52, 6.56) значение

$$dt = -\frac{J\omega_0}{M \mp M_c} ds$$

из уравнения движения и полагая, что за время пуска момент двигателя остается неизменным $M = M_{cp} = \text{const}$, получим общую формулу (для оценочных расчетов) для двигателей постоянного тока и асинхронных

$$\Delta W_{пт} = \frac{M_{cp}}{(M_{cp} \mp M_c)} \frac{J\omega_0^2}{2} (s_{нач}^2 - s_{кон}^2) = \frac{M_{cp}}{M_{cp} \mp M_c} \cdot \Delta W_{20}. \quad (6.71)$$

6.5. СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Во многих случаях переходные процессы занимают существенную часть общего цикла работы электроприводов, поэтому снижение потерь в таких режимах имеет важное значение. Отметим лишь приводы грузоподъемных механизмов, лифтов, многих транспортных средств, работа которых характеризуется частыми пусками и торможениями.

Анализ полученных выше соотношений, в частности (6.46, 6.65, 6.70), определяет два основных способа снижения потерь энергии в переходных процессах:

- 1) уменьшение момента инерции электропривода;
- 2) регулирование скорости идеального холостого хода.

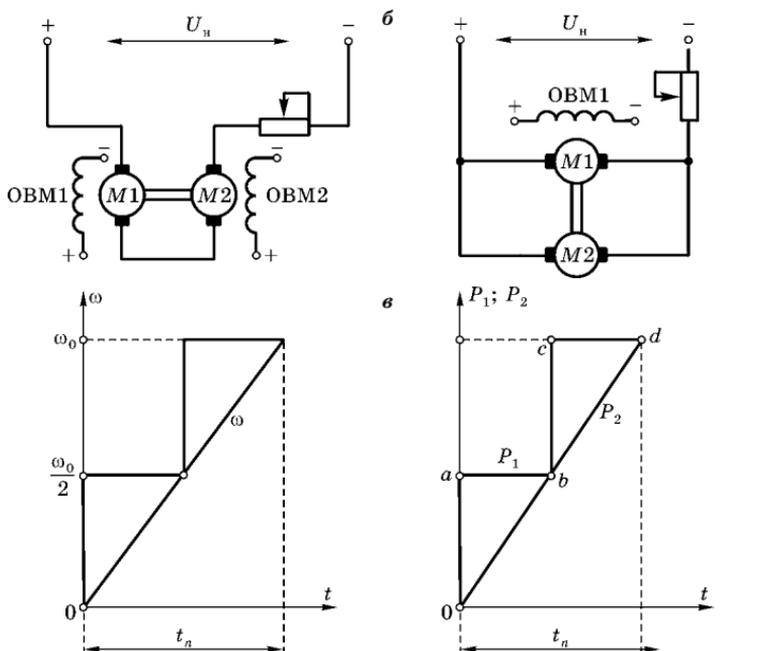
Уменьшение момента инерции ротора электродвигателей возможно:

- а) применением малоинерционных электродвигателей за счет повышения отношения длины к диаметру ротора;
- б) выбором рационального передаточного числа механической передачи, конструкционных материалов.

Регулирование скорости идеального холостого хода может быть обеспечено для ДПТ использованием систем УВ–Д, Г–Д, ШИП–Д (см. главу 3), а для асинхронных двигателей — изменением числа пар полюсов (ступенчато) и регулированием частоты по схеме ПЧ–АД (см. главу 4).

Рис. 6.11

Характеристики двухскоростного АД при двухступенчатом пуске (а); схема (б) и график процесса разгона (в) двухдвигательного привода с ДПТ независимого возбуждения в две ступени



Рассмотрим пуск двухскоростного АД на высокую скорость при $M_c = 0$, (рис. 6.11а). Пуск в этом случае возможен двумя способами: прямым включением обмотки на число полюсов p и скорость ω_{02} или включением обмотки сначала на число полюсов $2p$ и скорость ω_{01} с последующим переключением на p и ω_{02} (ступенчатый пуск), $\omega_{02} = 2\omega_{01}$.

При прямом пуске ($s_{\text{нач}} = 1$, $s_{\text{кон}} \approx 0$) потери энергии в роторе

$$\Delta W_{2\text{п}0} = \frac{J\omega_0^2}{2}(s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) = \frac{J\omega_{02}^2}{2}. \quad (6.72)$$

При пуске в две ступени: первая ступень, $s_{\text{нач}} = 1$, $s_{\text{кон}} = 0$; вторая ступень $s_{\text{нач}} = 0,5$, $s_{\text{кон}} = 0$. Соответственно потери

$$\begin{cases} \Delta W'_{2п0} = \frac{J\omega_{01}^2}{2} = \frac{J\omega_{02}^2}{8} \\ \Delta W''_{2п0} = \frac{J\omega_{02}^2}{2}(s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) = \frac{J\omega_{02}^2}{8}. \end{cases} \quad (6.73)$$

Суммарные потери за время пуска

$$\Delta W_{2п0} = \Delta W'_{2п0} + \Delta W''_{2п0} = \frac{J\omega_{02}^2}{4}. \quad (6.74)$$

Видно, что при пуске в 2 ступени потери энергии в цепи ротора вдвое меньше по сравнению с прямым пуском, при этом уменьшаются и потери в обмотке статора.

В общем случае, при n ступенях скорости идеального холостого хода, потери в роторе уменьшаются в n раз

$$\Delta W_2 = \frac{J\omega_{0n}^2}{2n}, \quad (6.75)$$

где ω_{0n} — максимальная скорость идеального холостого хода двигателя, соответствующая последней ступени.

Сокращаются потери и при ступенчатом торможении. При этом потери энергии при пуске в 2 ступени пропорциональны заштрихованной площади треугольника (рис. 6.9).

Для двигателей постоянного тока ступенчатое изменение скорости идеального холостого хода достигается в многодвигательных приводах переключением групп соединения: последовательное (последовательно-параллельное) — параллельное (рис. 6.11б). Следует отметить, что соотношение (6.75) соблюдается, если высшая скорость делится так, что разности синхронных скоростей на соседних ступенях равны. Если этого нет, то потери будут снижены в меньшей степени. Так, для АД с частотами вращения 1000/1500 об/мин $\Delta W_2^* = 0,55$, а для трехскоростного (1000/1500/3000 об/мин), $\Delta W_2^* = 0,39$. На практике это используется на железнодорожном транспорте.

Например, вагоны метро все моторные. Двигатели на напряжение $U = 375$ В, в контактной сети $U_c = 750$ В. Пуск возможен в две ступени для одного вагона (4 двигателя)

или в три ступени для двух вагонов (8 двигателей). Характер изменения потерь при этом будет таким же, как показанный на рис. 6.11б.

Из (6.75) следует, что при $n \rightarrow \infty$ потери можно сократить до нуля (теоретически). Реально это можно сделать при плавном изменении ω_0 в приводах Г–Д, П–ДПТ, ПЧ–АД, причем оно должно быть очень медленным. Практически по условиям функционирования время переходного процесса $t_{\text{пт}}$ ограничено, поэтому потери можно только существенно снизить. Например, при линейном изменении напряжения на якоре ДПТ [3, 4] потери энергии

$$\Delta W_{\text{п0}} = \frac{J \omega_{0\text{п}}^2}{2} \cdot \frac{2T_{\text{м}}}{t_{\text{п0}}}. \quad (6.76)$$

Видно, что степень их снижения определяется соотношением электромеханической постоянной времени $T_{\text{м}}$ и времени пуска $t_{\text{п0}}$, или величиной $\frac{dU}{dt}$. Для асинхронных приводов аналогичным показателем является темп увеличения частоты $\frac{df}{dt}$ и, соответственно, напряжения. В современных ПЧ величина $\frac{df}{dt}$ при пуске может задаваться в широких пределах [10, 11]. Реально пуск производят при токах $I_1 \leq 1, 5I_{1\text{н}}$.

Обычно при частотном управлении минимальные потери достигаются при оптимальном значении частоты вто-

ричных токов f_2 или абсолютного скольжения $\beta_{\text{опт}} = \frac{f_2}{f_{\text{н}}}$.

При этом заданному току статора соответствует наибольший электромагнитный момент, что обеспечивает необходимое быстроедействие (время $t_{\text{п0}}$).

Пример 6.2. В примере 6.1 предполагалось, что при напряжении в контактной сети $U_{\text{с}} = 3000$ В и $U_{\text{ан}} = 750$ В все четыре двигателя соединены всегда последовательно. В настоящее время промышленность выпускает комплекты электрооборудования моторных вагонов с двигателями на напряжение $U_{\text{ан}} = 1500$ В. Следовательно, пуск

и торможение можно проводить в две ступени — в последовательном и последовательно-параллельном соединении. При этом потери снижаются в два раза.

Пример 6.3. Двухскоростной АД имеет данные:

$$P_n = 2,5 \text{ кВт}; n_{01} = 1500 \text{ об/мин};$$

$$n_{02} = 3000 \text{ об/мин}; J = 0,23 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \frac{R_1}{R_2'} = 1,6; M_c = 0.$$

Рассчитать потери энергии при прямом и ступенчатом пусках и торможениях.

1. Угловые скорости

$$\omega_{02} = \frac{2\pi n_{02}}{60} = \frac{2\pi \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с}; \omega_{01} = 157 \text{ рад/с}.$$

2. Полные потери при прямом пуске, по (6.70)

$$\begin{aligned} \Delta W_{п0} &= \frac{J\omega_{02}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) = \\ &= \frac{0,23 \cdot 314^2}{2} (1 + 1,6)(1^2 - 0^2) = 33\,325 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

3. Потери при ступенчатом пуске:

а) пуск до скорости ω_{02}

$$\Delta W_{п01} = \frac{J\omega_{02}^2}{2} (1 + 1,6) \cdot (1^2 - 0^2) = \frac{0,23 \cdot 157^2}{2} \cdot 2,6 \cdot 1 = 7370 \text{ Дж};$$

б) пуск до скорости ω_{02} ($s_{\text{нач}} = 0,5$, $s_{\text{кон}} = 0$)

$$\Delta W_{п02} = \frac{0,23 \cdot 314^2}{2} (1 + 1,6) \cdot (0,25 - 0) = 7370 \text{ Дж};$$

в) суммарные потери при ступенчатом пуске

$$\Delta W_{п0} = \Delta W_{п01} + \Delta W_{п02} = 14\,740 \text{ Дж}.$$

Потери уменьшились в 2 раза по сравнению с прямым пуском.

4. Потери энергии при одноступенчатом торможении противовключением от ω_{02} до нуля при ($s_{\text{нач}} = 2$, $s_{\text{кон}} = 1$)

$$\Delta W_{т0} = \frac{0,23 \cdot 314^2}{2} (1 + 1,6) \cdot (2^2 - 1^2) = 88440 \text{ Дж}.$$

5. Потери энергии при двухступенчатом торможении:

а) генераторное (динамическое) торможение от ω_{02} до ω_{01}

$$\Delta W_{\tau 01} = \frac{0,26 \cdot 157^2}{2} (1 + 1,6) \cdot (1^2 - 0^2) = 7370 \text{ Дж};$$

б) торможение противовключением от ω_{01} до 0

$$\Delta W_{\tau 02} = \frac{0,26 \cdot 157^2}{2} (1 + 1,6) \cdot (2^2 - 1^2) = 22110 \text{ Дж};$$

в) суммарные потери

$$\Delta W_{\tau 0} = \Delta W_{\tau 01} + \Delta W_{\tau 02} = 7320 + 22110 = 29480 \text{ Дж}.$$

По сравнению с одноступенчатым торможением здесь потери уменьшились в 3 раза.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие характеристики электропривода определяют его энергоэффективность?
2. Какие составляющие потерь в двигателе относят к постоянным и переменным потерям?
3. От каких величин и как зависят постоянные и переменные потери?
4. Как зависят КПД и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей от загрузки?
5. Что определяет $\cos \varphi$ асинхронного двигателя при питании от сети?
6. Как изменяется КПД асинхронного электропривода при регулировании скорости вниз от номинальной при $M = \text{const}$?
7. Чем определяются потери при пуске электроприводов?
8. Как практически снижают потери в динамических режимах в приводах постоянного и переменного тока?
9. От чего зависит частота включений асинхронных короткозамкнутых двигателей?

7 ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ

7.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ДВИГАТЕЛЯ

Надежная и экономичная работа электропривода возможна только при соответствии двигателя режимам, в которых он должен работать совместно с производственным механизмом, и ожидаемой нагрузке.

Основным требованием при выборе электродвигателя является соответствие его мощности условиям технологического процесса. Определяющими при выборе мощности являются нагрев его обмоток, а также возможные кратковременные перегрузки. Следовательно, при работе двигателя температура изоляции обмоток не должна превышать предельных допустимых значений для используемого класса изоляции.

При недостаточной мощности будет повышенный нагрев, ускоренное старение изоляции и выход двигателя из строя.

При завышенной мощности растут начальная стоимость привода, потери энергии из-за снижения КПД, а для асинхронного электропривода и коэффициента мощности [23, 24].

Важным является соответствие условиям пуска рабочей машины и возможным перегрузкам, т. е. пусковому и максимальному моментам двигателя.

Выбор серийных двигателей производится с учетом следующих показателей [2, 3, 4]:

1. Двигатель должен иметь *род и величину* напряжения, соответствующие сетям предприятий.

2. Для вновь проектируемого привода *номинальная скорость* двигателя и *передаточное число редуктора* вы-

бираются на основе технико-экономического обоснования. Это особенно важно для электроприводов, работающих с частыми пусками, реверсами, остановками. При имеющемся редукторе выбор номинальной скорости двигателя проводится по заданной скорости исполнительного органа и передаточному числу редуктора.

3. *Способ вентиляции*: естественная, самовентиляция и независимая (принудительная). *Способ защиты от действия окружающей среды*: двигатели открытые, защищенные и герметичные. Для работы в особых условиях выпускаются специализированные двигатели [24].

Порядок выбора электродвигателя:

- 1) расчет мощности и предварительный выбор;
- 2) проверка выбранного двигателя по условиям пуска и перегрузки;
- 3) проверка выбранного двигателя по нагреву.

Если выбранный в п. 1 двигатель не соответствует условиям 2 или 3, выбирают другой и проверка повторяется.

Основой для расчета мощности и выбора электродвигателя является нагрузочная диаграмма и диаграмма скорости (тахограмма) исполнительного органа рабочей машины.

Нагрузочная диаграмма рабочей машины — это зависимость приведенного к валу двигателя статического момента нагрузки от времени $M_c(t)$.

Нагрузочная диаграмма привода, как правило, не совпадает с нагрузочной диаграммой рабочей машины вследствие наличия инерционных масс (моментов инерции) и наклона механических характеристик двигателей (жесткость $\beta \neq \infty$). При пиках нагрузки инерционные массы отдают часть запаса кинетической энергии, облегчая работу двигателя. При высокой пиковой нагрузке иногда с целью сглаживания нагрузочной диаграммы искусственно увеличивают момент инерции, устанавливая маховик. Особо отметим, что выбор мощности двигателя может быть сделан только на основе нагрузочной диаграммы самого двигателя. При предварительном выборе двигателя его номинальный момент принимается большим, чем среднее

значение статического момента с учетом динамических нагрузок.

$$M_H = K_3 M_{c3} = (1,1 \div 1,5) M_{c3}, \quad (7.1)$$

где $K_3 = (1,1 \div 1,5)$; M_{c3} — среднее квадратичное значение статического момента (приведенного) за цикл работы $t_{ц}$. Коэффициент запаса K_3 в (7.1) должен быть тем больше, чем резче пики нагрузки рабочей машины и больше включений в час должен иметь двигатель.

Диаграмма скорости — это зависимость скорости движения исполнительного органа от времени $v_{ио}(t)$ или $\omega_{ио}(t)$. При известном передаточном числе редуктора после приведения тахограмма изображается графиком $\omega(t)$.

На рис. 7.1а, б в качестве примера приведены нагрузочная диаграмма и тахограмма рабочей машины; на

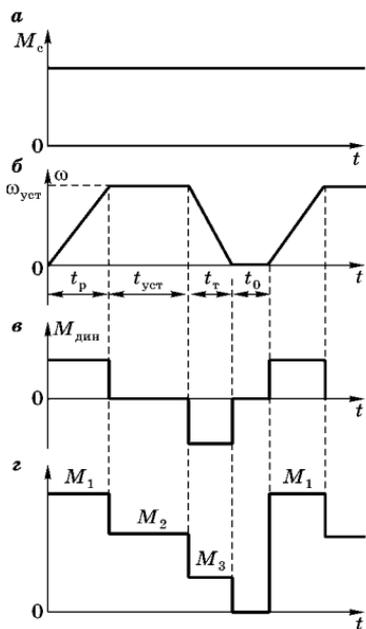


Рис. 7.1
К расчету мощности
и проверке двигателя:

а — нагрузочная диаграмма исполнительного органа; б — диаграмма скорости; в — график динамического момента; з — зависимость момента двигателя от времени.

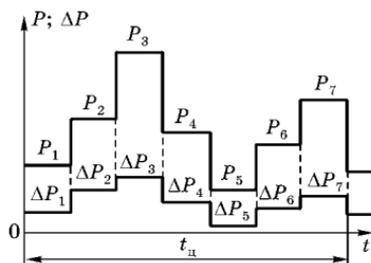
рис. 7.1в, з — график динамического момента (пуск и торможение) и момента двигателя $M(t)$. Цикл состоит из участков разгона t_p , движения с установившейся скоростью $t_{уст}$, торможения t_t и паузы t_0 . Время цикла $t_{ц} = t_p + t_{уст} + t_t + t_0$. На примере приведенных диаграмм порядок расчета мощности, предварительного выбора и проверки двигателя следующий:

1. Ориентировочно определяется номинальный момент двигателя согласно формуле (7.1)

$$M_H \geq K_3 M_{c3}, \quad (7.2)$$

где $K_3 = (1,1 \div 1,5)$ учитывает динамические режимы. Для диаграммы, показанной на рис. 7.1, $M_{c3} = M_c$. Если момент нагрузки M_c (ток, мощность) изменяется во време-

Рис. 7.2
Ступенчатый график
мощности на валу
двигателя и потерь в нем
при продолжительной
нагрузке



ни (рис. 7.2), что чаще бывает на практике, то эквивалентный момент (ток, мощность) определяется как средняя квадратичная величина, аналогично действующему значению переменного тока.

$$M_{сэ} = \sqrt{\frac{1}{t_{ц}} \sum_{i=1}^n M_{ci}^2 t_i}, \quad (7.3)$$

где M_{ci} , t_i — момент и длительность i -го участка нагрузочной диаграммы производственного механизма. Для рис. 7.1 $M_{сэ} = M_c = \text{const}$.

Как известно, нагрев двигателя определяется графиком тока $I(t)$, т. е. потерь ΔP_v . Поэтому методом эквивалентного момента можно пользоваться, если момент пропорционален току. Например, при ослаблении поля в ДПТ эта пропорциональность отсутствует:

$$I'_a = I_{ан} \frac{\Phi_n}{\Phi} = I_{ан} \frac{\omega'}{\omega},$$

поэтому приходится переходить к графику тока, построенному в масштабе моментов.

2. Определяется номинальная скорость двигателя. Для рассматриваемого случая (рис. 7.1) $\omega_n \geq \omega_{уст}$.

3. Рассчитывается номинальная мощность двигателя

$$P_n = M_n \omega_n \geq K_3 M_{сэ} \omega_{уст}. \quad (7.4)$$

4. По каталогу выбирается электродвигатель ближайшей большей мощности и скорости соответствующего исполнения.

5. Проводится проверка выбранного двигателя по перегрузочной способности.

Момент двигателя в зависимости от времени на основании уравнения движения

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} = M_c + M_{\text{дин}}. \quad (7.5)$$

Динамический момент $M_{\text{дин}}$ определяется суммарным приведенным моментом инерции J и ускорениями $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ на участках разгона и торможения. При $\varepsilon = \text{const}$ (рис. 7.1б) $M_{\text{дин}} = \text{const}$. Следовательно, нагрузочная диаграмма двигателя представляет собой алгебраическую сумму моментов M_c и $M_{\text{дин}}$ в зависимости от времени (рис. 7.1з).

Таким образом, для рассматриваемого случая должно выполняться следующее условие

$$M_m > M_1. \quad (7.6)$$

Если условие (7.6) выполняется, то двигатель обеспечит ускорение на участке разгона t_p (см. рис. 7.1б, з), если нет, следует выбрать другой двигатель. Напомним, что для двигателей постоянного тока максимальный момент ограничен коммутацией (по току якоря), $\frac{M_m}{M_n} = (2 \div 3)$; для асинхронных двигателей $\frac{M_m}{M_n} = (2 \div 3)$.

6. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором при прямом пуске должны проверяться по условиям пуска

$$M_n > M_c. \quad (7.7)$$

Для рассмотренного примера (см. рис. 7.1) $M_n > M_c$.

Для двигателей с фазным ротором возможно $M_m = M_n$, что достигается выбором пусковых сопротивлений в цепи ротора.

Необходимо отметить, что допустимые отклонения напряжения сети переменного тока составляют $(5 \div 10)\%$, а в сельских сетях из-за их протяженности и недостаточной мощности, особенно при пуске, существенно больше. Следовательно, момент двигателя снижается, и условие (7.7) будет

$$K_u^2 \cdot M_{\Pi} > M_{\text{сн}}, \quad (7.8)$$

где $K_u = \frac{U}{U_{\text{н}}}$.

Если выбранный двигатель удовлетворяет условиям, изложенным в п. 5 и 6, проводятся проверка по нагреву. Этот этап рассматривается в следующих параграфах.

7.2. НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ. КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Работа электрических машин сопровождается потерями, которые вызывают нагревание машины; а ее отдельные элементы — обмотки, магнитопроводы и др. нагреваются по-разному. Очевидно, что машина может нагреваться лишь до определенной допустимой температуры, определяемой нагревостойкостью изоляционных материалов. Соблюдение установленных ограничений по температуре нагрева обеспечивает нормативный срок службы машины в течение 15–20 лет. Повышение допустимых значений температуры приводит к преждевременному разрушению изоляции обмоток и сокращению срока службы. Так, для изоляции класса А превышение допустимой температуры на 8–10°C сокращает этот срок вдвое.

Анализ теплового состояния двигателя позволяет оценить степень его загрузки по мощности. Если нагрев двигателя близок к нормативному, это говорит о хорошем использовании установленной мощности двигателя. Если нагрев двигателя существенно меньше нормативного, то он недогружен и его мощность завышена по сравнению с требуемой. Кроме того, при малой загрузке энергетические показатели — КПД и $\cos \phi$ имеют меньшие по сравнению с номинальными значения (см. рис. 6.1).

Изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, делятся на классы по допустимой предельной температуре (см. табл. 7.1). Основными классами изоляции в электрических машинах в настоящее время являются В, F, H.

При выполнении тепловых расчетов принимается стандартная температура окружающей среды, равная 40°C.

Таблица 7.1

Классы изоляции

Класс изоляции	A	E	B	F	H	C
Предельная температура, °C	105	120	130	155	180	>180

Очевидно, что при снижении температуры двигатель может быть нагружен несколько выше номинальной мощности, а при повышении — ниже.

Тепловые потоки под действием разности температур отдельных элементов машины, корпуса и окружающей среды распространяются путем теплопроводности, конвекции и лучеиспускания.

Отдельные части машины, выполненные из различных материалов, имеют разные теплоемкость и теплопроводность. Неодинаковыми являются и условия нагрева отдельных элементов.

Следовательно, точное исследование тепловых процессов машины представляет собой очень сложную задачу. Поэтому в теории электропривода изучение процессов нагрева и охлаждения двигателей проводится при следующих допущениях [2, 3, 4]:

1) двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее теплопроводность $\lambda = \infty$ и одинаковую температуру по всему объему;

2) теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна разности температур машины и окружающей среды (превышению температуры);

3) теплоемкость двигателя и коэффициент теплоотдачи не зависят от температуры.

Таким образом, имеем массу тела (двигателя) m , наружную поверхность $S_{\text{пов}}$, коэффициент теплоотдачи α , Дж/(м²·°C), удельную теплоемкость c , Дж/(кг·°C). Требуется определить характер процесса изменения температуры $\Theta(t)$, если суммарные потери ΔP .

Уравнение теплового баланса:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (7.9)$$

где dQ — тепловая энергия, выделившаяся в машине за время dt ; dQ_1 — часть энергии, которая аккумулируется

в двигателе и вызывает его нагрев; dQ_2 — энергия, отданная в окружающую среду.

Выразив составляющие уравнения (7.9) через тепловые параметры машины и время, получим:

$$\begin{aligned}\Delta P dt &= cm d\Theta + \alpha S \Theta dt; \\ \Delta P dt &= C d\Theta + A \Theta dt,\end{aligned}\quad (7.10)$$

где ΔP — потери в двигателе, Вт; $C = cm$ — общая теплоемкость, Дж/°С; $A = \alpha S$ — теплоотдача с поверхности машины в окружающую среду, Дж/°С; $\Theta = \Theta_{\text{дв}} - \Theta_{\text{опр}}$ — превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

Разделив (7.10) на dt , получим:

$$\Delta P = C \frac{d\Theta}{dt} + A \cdot \Theta. \quad (7.11)$$

При $t \rightarrow \infty$, когда тепловой режим устанавливается, т. е. $\Theta = \text{const}$, тепловыделение равно теплоотдаче, $\frac{d\Theta}{dt} = 0$. Следовательно, установившееся значение превышения температуры

$$\Theta_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{A} = \frac{\Delta P}{\alpha S}. \quad (7.12)$$

Решение уравнения (7.10) будет [3, 4]

$$\Theta(t) = \Theta_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}\right) + \Theta_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_n}}, \quad (7.13)$$

где $T_n = \frac{C}{A} = \frac{cm}{\alpha S}$ — постоянная времени нагрева, которая равна времени нагрева тела до установившейся температуры без отдачи тепла в окружающую среду.

Величина T_n изменяется от нескольких минут для машин малой мощности до нескольких часов у крупных машин (мощностью $P > 100$ кВт).

Из (7.13) видно, что при скачке потерь (тепловыделения) температура тела двигателя изменяется монотонно, по экспоненте, скорость нарастания определяется величиной T_n . Роль инерционного элемента здесь выполняет теплоемкость C , подобно массе в механике, индуктивности в электромагнитных процессах.

При сбросе нагрузки ($\Delta P = 0$) происходит охлаждение машины по закону

$$\Theta(t) = \Theta_y e^{\frac{-t}{T_{oc}}}, \quad (7.14)$$

где T_{oc} — постоянная времени остывания, зависит от внешних условий теплоотдачи.

В общем случае $T_n \neq T_{oc}$ и, если машина охлаждается при отсутствии искусственной вентиляции, то $T_{oc} > T_n$.

Количественно ухудшение теплоотдачи характеризуется коэффициентом ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе.

$$\beta_0 = \frac{A_0}{A} = (0,3 \div 0,95), \quad (7.15)$$

где A_0, A — теплоотдача при неподвижном роторе и номинальной скорости соответственно.

Для случая независимой вентиляции $\beta = 1$, $T_n = T_{oc}$. На рис. 7.3 приведены кривые нагревания и охлаждения однородного тела. Процесс нагрева можно считать установившимся, когда превышение температуры двигателя достигает $(0,95 \div 0,98)\Theta_{уст}$. При этом время $t_{уст} \approx (3 \div 4)T_n$.

Для оценки теплового режима электродвигателей необходимо знать график (диаграмму) потерь мощности от времени, который, в свою очередь, определяется диаграммой изменения нагрузки двигателя. По характеру изменения нагрузки на валу двигателя существующая классификация предусматривает восемь типовых режимов с услов-

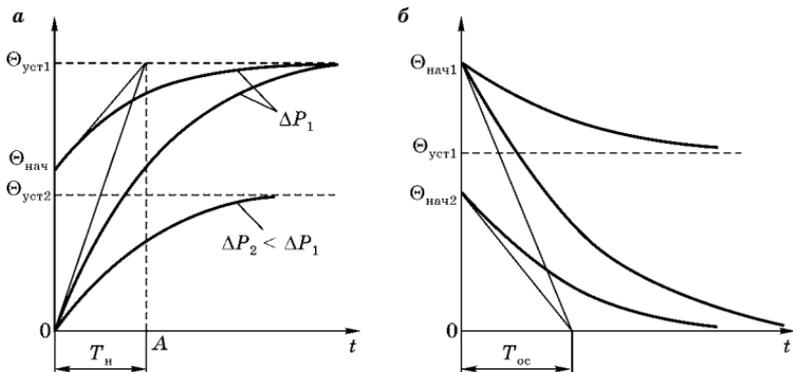


Рис. 7.3
Кривые нагревания (а) и охлаждения (б) двигателя

ными обозначениями от S1 до S8 (рис. 7.4). При этом основными номинальными режимами являются S1, S2, S3, а остальные — их разновидности.

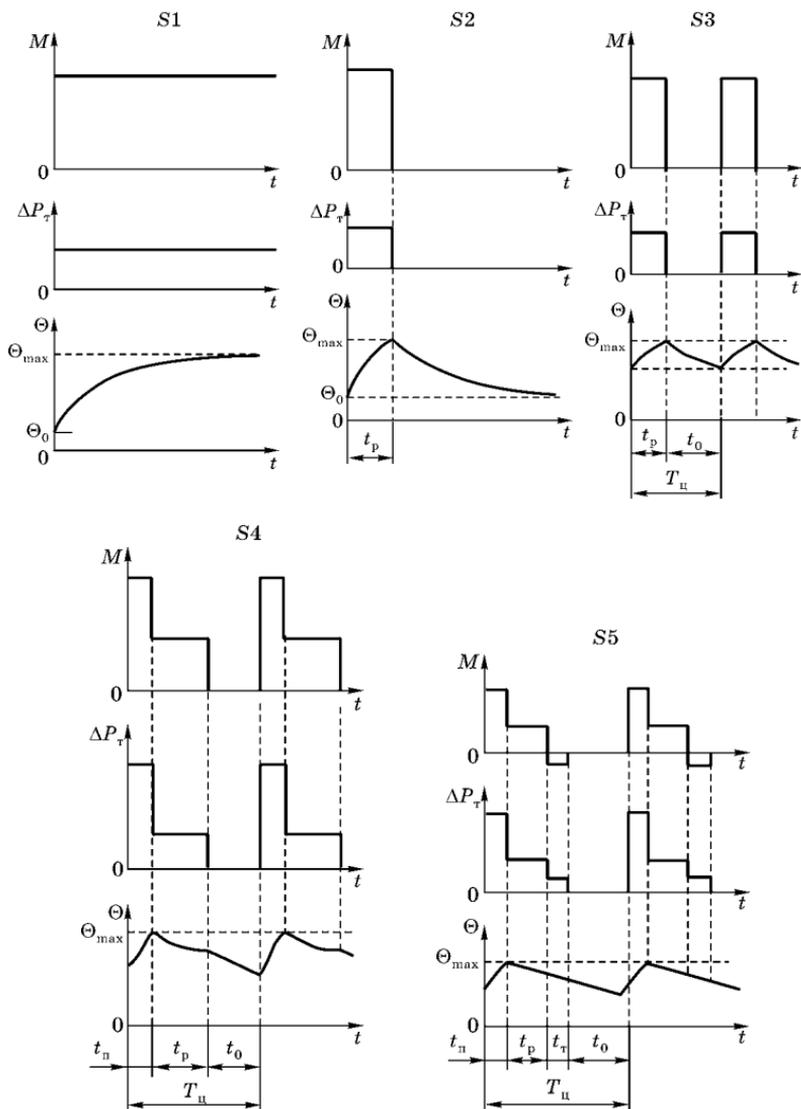


Рис. 7.4
Нагрузочные диаграммы в режимах S1-S8

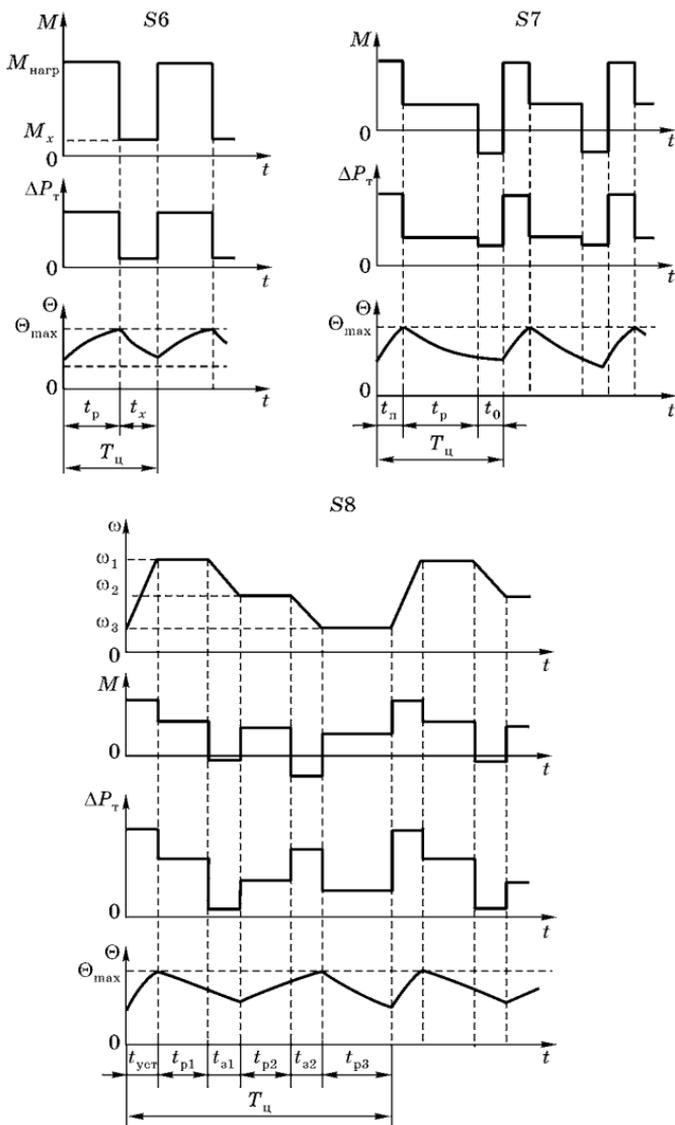


Рис. 7.4 (Продолжение)
Нагрузочные диаграммы в режимах S1–S8

Для работы в режимах S1, S2, S3 промышленность выпускает электрические машины, режим и соответствующие ему номинальные данные указываются на щитке.

1. *Продолжительный номинальный режим работы (S1)* — работа двигателя при неизменной нагрузке, продолжающейся столько времени, что превышение температуры всех его частей достигает установившегося значения (рис. 7.4). Время работы при этом $t_p > (3 \div 4)T_n$.

2. *Кратковременный номинальный режим (S2)* — чередование периодов неизменной нагрузки с паузами (рис. 7.4); при этом за время работы температура двигателя не достигает установившегося значения $\Theta_{уст} = \frac{\Delta P}{A}$, а за время отключения все части двигателя охлаждаются до температуры окружающей среды. Стандартные значения длительности работы — 10, 30, 60 и 90 мин. Для тяговых двигателей электротранспорта расчетным является часовой режим, $t_p = 60$ мин.

3. *Повторно-кратковременный номинальный режим (S3)* — периоды неизменной нагрузки чередуются с паузами (см. рис. 7.4), причем за интервалы работы и пауз температура не достигает установившихся значений.

При этом максимальная продолжительность цикла $t_{ц} = t_p + t_0$ принята равной 10 мин, а сам режим характеризуется относительной продолжительностью включения ε или продолжительностью включения ПВ%

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_0} = \frac{t_p}{t_{ц}}; \text{ПВ}\% = \frac{t_p}{t_{ц}} \cdot 100\% = \varepsilon \cdot 100\%. \quad (7.16)$$

Стандартные значения ПВ составляют 15, 25, 40 и 60%.

Режимы S4–S8 являются более сложными, включают периоды пуска, холостого хода, торможения, реверса, работы при разных скоростях. Основным остается определение по диаграммам нагрузки допустимых потерь.

В дальнейшем анализ тепловых процессов двигателя и оценка его нагрева проводится для режимов S1, S2, S3.

7.3. ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

В режиме S1 двигатели могут работать с постоянной или переменной (циклической) нагрузкой.

Постоянная нагрузка. Графики изменения момента и потерь приведены на рис. 7.4.

При этом $\omega = \text{const}$, $P = M\omega = \text{const}$, двигатель выбирается по условию $P \leq P_n$, следовательно, выполняется и условие $\Delta P \leq \Delta P_n$, $\Theta_{\max} = \Theta_{\text{уст}} d'' \Theta_{\text{доп}}$, где $\Theta_{\text{доп}}$ — допустимое превышение температуры; P_n , ΔP_n — номинальные мощность и потери двигателя соответственно. Очевидно, что здесь не требуется дополнительных расчетов по определению теплового режима двигателя. Если в каталоге нет двигателя по значению рассчитанной мощности, то выбирается ближайший больший. Примером таких механизмов могут служить насосы и вентиляторы, работающие при постоянных расходе Q и напоре H .

Для насоса мощность двигателя

$$P = \frac{pQ}{\eta_{\text{нас}}} = \frac{Q\rho Hg}{\eta_{\text{нас}}}, \quad (7.17)$$

где p — давление, Па; Q — расход, $\text{м}^3/\text{с}$; $\eta_{\text{нас}}$ — КПД насоса; ρ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; H — напор, м; $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$. КПД насосов зависит от типа, скорости и давления, $\eta_{\text{нас}} = 0,3 \div 0,8$. [5, 52]

Пример. $Q = 360 \text{ м}^3/\text{ч}$; $H = 150 \text{ м}$; $\eta_{\text{нас}} = 0,75$; $n = 1500$ об/мин насос для перекачки воды.

$$P = \frac{360 \cdot 1000 \cdot 150 \cdot 9,8}{3600 \cdot 0,75} = 196\,000 \text{ кВт.}$$

При этом давление

$$p = \rho Hg = 1000 \cdot 150 \cdot 9,8 = 1,47 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Двигатель: 4А315М4У3, $P_n = 200 \text{ кВт}$.

Для вентиляторов, как и для насосов,

$$P = \frac{p \cdot Q}{\eta_{\text{вент}}}, \quad (7.18)$$

где p — давление, Па; Q — расход, $\text{м}^3/\text{с}$; $\eta_{\text{вент}}$ — КПД, $\eta = (0,3 \div 0,8)$ — для центробежных вентиляторов; $\eta_{\text{вент}} = (0,2 \div 0,4)$ — для осевых [5, 52].

Переменная циклическая нагрузка. Если в режиме S1 нагрузка на валу периодически изменяется (циклический характер, см. рис. 7.2), то так же будут изменяться потери в двигателе и его температура. Обязательным остается условие

$$\Theta_{\max} \leq \Theta_{\text{доп}}. \quad (7.19)$$

Отметим, что Θ_{\max} — усредненное значение температуры, а сама оценка нагрева двигателя может быть выполнена прямым или косвенным методом.

Прямой метод проверки заключается в расчете зависимости $\Theta(t)$ по формуле (7.13). Для этого необходимо знать тепловые параметры двигателя — C, A, T_n , которые не приводятся в каталогах, а расчет их весьма приближен. Поэтому на практике задача проверки двигателей по нагреву проводится, как правило, косвенными методами. Основными из них являются:

- метод средних потерь;
- методы эквивалентных величин — момента, тока и мощности.

Метод средних потерь является наиболее точным и универсальным. Суть его заключается в определении средних потерь ΔP_{cp} за цикл работы двигателя с их последующим сопоставлением с потерями в номинальном режиме. Условие соответствия двигателя по нагреву будет (см. рис. 7.2)

$$\Delta P_{\text{cp}} \leq \Delta P_n; \Delta P_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta P_i t_i}{t_{\text{ц}}}, \quad (7.20)$$

где ΔP_i — потери на i -м интервале; t_i — длительность интервала; m — число интервалов.

Сам расчет потерь производится за цикл, достаточно удаленный ($t_p > 3T_n$), когда величина среднего превышения температуры не изменяется, т. е. $\Theta_{\text{cp}} \approx \text{const}$. В этом случае тепловыделение равно теплоотдаче, а температура

$$\Theta_{\text{cp}} = \frac{\Delta P_{\text{cp}}}{A}.$$

Если $\Delta P_{\text{cp}} > \Delta P_n$, то двигатель будет перегреваться, а при $\Delta P_{\text{cp}} < \Delta P_n$ — недоиспользоваться по нагреву. В обоих случаях следует выбрать другой двигатель, построить новую зависимость $\Delta P = f(t)$ и вновь выполнить проверку.

Действительное максимальное значение температуры отличается от среднего, и различие зависит от соотношения длительности цикла и постоянной времени нагрева. Расхождение среднего и наибольшего значений температуры незначительно, если $t_{\text{ц}} \ll T_n$ и $qt_{\text{ц}} > (3 \div 4)T_n$, где q — число циклов. При этом $\Theta_{\max} \approx \Theta_{\text{cp}}$.

Применительно к графику работы, показанному на рис. 7.4, когда на каждом участке цикла $M_i = \text{const}$, $\Delta P_i = \text{const}$,

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}. \quad (7.21)$$

Потери в двигателе для номинального режима определяются по каталожным данным $P_{\text{н}}$, $\eta_{\text{н}}$.

$$\Delta P_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}(1 - \eta_{\text{н}})}{\eta_{\text{н}}}, \quad (7.22)$$

где $\eta_{\text{н}}$ — КПД двигателя в номинальном режиме.

На основе метода средних потерь базируются методы эквивалентных величин — тока, момента, мощности. Действительно, переменные потери в двигателе пропорциональны I^2 , а момент и мощность — току в первой степени при условии постоянства потока.

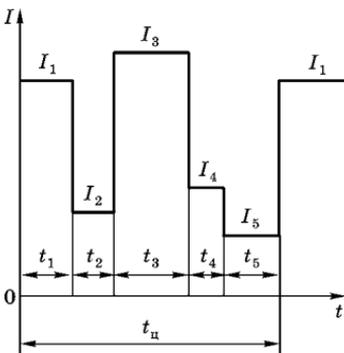


Рис. 7.5
Диаграмма изменения тока двигателя при циклической нагрузке

Во всех случаях предполагается, что теплоотдача остается неизменной или учитывается с помощью коэффициента ее ухудшения (см. 7.2).

Метод эквивалентного тока используется, когда известен график $I(t)$ (рис. 7.5). Условие работы двигателя по нагреву через среднеквадратичный ток, эквивалентный действительному, изменяющемуся по времени, будет

$$I_{\text{э}} \leq I_{\text{н}}, \quad (7.23)$$

где $I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^m I_i^2 \cdot t_i}$ — эквивалентное значение тока.

Для графика, показанного на рис. 7.5,

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + I_4^2 t_4 + I_5^2 t_5}{t_{\text{ц}}}}, \quad (7.24)$$

а при произвольной форме тока

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} i^2(t) dt}. \quad (7.25)$$

Отметим, что условие (7.23) справедливо, если постоянные потери не изменяются за цикл работы, т. е. $\Delta P_{\text{с}} = \text{const}$. Это может быть при $\omega \approx \text{const}$, $\Phi = \text{const}$.

Метод эквивалентного момента используется при известном графике $M(t)$ (см. рис. 7.4). Здесь должно соблюдаться условие — постоянство магнитного потока на протяжении всего цикла работы двигателя. Это требование вытекает из соотношений для электромагнитного момента ДПТ $M = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{а}}$ и АД $M = C_{\text{м}} \Phi I_2 \cos \psi_2$.

Условие работы двигателя в этом случае будет

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i} \leq M_{\text{н}}. \quad (7.26)$$

Метод эквивалентной мощности предполагает график изменения мощности $P = M\omega = f(t)$ (см. рис. 7.2), но при дополнительном, по сравнению с методом эквивалентного момента, условии: не только $\Phi = \text{const}$, но и $\omega = \omega_{\text{н}} = \text{const}$. Само условие записывается в виде

$$\sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n (M_i \omega)^2 t_i} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n P_i^2 t_i} = M_{\text{э}} \omega_{\text{н}} = P_{\text{э}} \leq M_{\text{н}} \omega_{\text{н}} = P_{\text{н}}. \quad (7.27)$$

В практических расчетах используют одну из приведенных выше нагрузочных диаграмм — $\Delta P(t)$, $i(t)$, $M(t)$, $P(t)$, которая обеспечивает наиболее простой расчет и выполнение необходимых допущений при определении эквивалентных величин.

7.4. ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Кратковременный режим работы характеризуется графиками, изображенными на рис. 7.6 (также см. рис. 7.4). В течение времени $t_{\text{р}}$ двигатель нагружен мощностью $P_{\text{к}}$, а затем длительное время отключен, а тем-

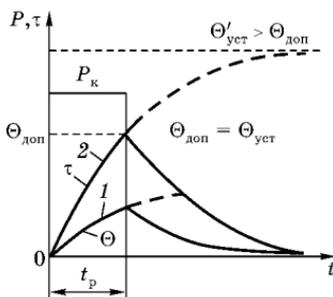


Рис. 7.6

Графики кратковременного режима работы двигателя

температура его частей достигает температуры окружающей среды. За время работы температура двигателя не успевает достигнуть установившегося значения $\Theta'_{уст}$, соответствующего продолжительному режиму S1 при мощности P_k .

Для полного использования в режиме S2 двигателя, предназначенного для режима S1, его следует перегружать, т. е.

$P_k > P_n$. Степень перегрузки зависит от продолжительности времени работы и постоянной времени нагрева. При этом к концу рабочего периода температура двигателя не должна превышать предельно допустимого значения (см. рис. 7.6)

$$\Theta_{доп} = \Theta_{уст} = \Theta'_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}} \right). \quad (7.28)$$

Для количественной оценки возможной перегрузки используются коэффициенты термической и механической перегрузки.

Коэффициент термической перегрузки — это отношение потерь мощности в кратковременном режиме к номинальным потерям (в режиме S1)

$$p_T = \frac{\Delta P_k}{\Delta P_n} = \frac{\Theta'_{уст}}{\Theta_{уст}} = \frac{1}{\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}} \right)}. \quad (7.29)$$

Коэффициент механической перегрузки — это отношение мощностей в кратковременном и продолжительном режимах работы

$$p_M = \frac{P_k}{P_n} = \sqrt{(1+a) \cdot p_T - a}, \quad (7.30)$$

где $a = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_v}$ — коэффициент потерь (см. главу 6); ΔP_c , ΔP_v — постоянные и переменные потери соответственно.

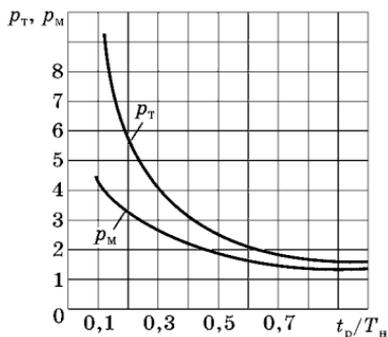


Рис. 7.7

Зависимости коэффициентов термической и механической перегрузки от относительной продолжительности работы

Подставив в (7.30) значение p_T по (7.29), получим

$$p_M = \sqrt{\frac{(1+a)p_T}{\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}\right) - a}}. \quad (7.31)$$

Зависимости коэффициентов термической и механической перегрузок от относительного времени работы при $a = 1$ представлены на рис. 7.7. Если пренебречь постоянными потерями, т. е. принять $a = 0$, то

$$p_M = \sqrt{\frac{1}{\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}\right)}} = \sqrt{p_T}. \quad (7.32)$$

Из рис. 7.7 видно, что при $\frac{t_p}{T_H} = 0,3 \div 0,4$ допустимый по условиям нагрева коэффициент механической перегрузки близок к значению 2,5, что соответствует перегрузочной способности двигателей по моменту (АД) и по току якоря (ДПТ). Следовательно, при $\frac{t_p}{T_H} \leq 0,3$ полное использование таких двигателей по нагреву ограничено их перегрузочной способностью. Поэтому при малых $\frac{t_p}{T_H}$ можно не проводить проверку двигателей по нагреву, а выполнить ее только по условиям перегрузки.

Отметим, что при изменяющейся нагрузке за время работы t_p необходимо заменить реальную нагрузочную диаграмму эквивалентной (см. рис. 7.4), воспользовавшись методом эквивалентных величин (см. 7.3).

Для проверяемого по условиям нагрева двигателя должны быть известны номинальный момент M_H , постоянная времени нагрева T_H , коэффициент потерь. Необходимое условие при этом

$$M_K = M_H \cdot p_M \leq M_э \quad \text{или} \quad P_K = P_H \cdot p_M \leq P_э, \quad (7.33)$$

где P_k, M_k — мощность и момент в кратковременном режиме; $P_k = M_k \omega_n$; $P_n = M_n \omega_n$; $M_э$ — эквивалентный момент при изменяющейся нагрузке.

Промышленность выпускает специальные двигатели для номинального кратковременного режима. Основные их особенности — повышенная перегрузочная способность и постоянные потери. В таких двигателях проверка по нагреву требуется, если нагрузочная диаграмма не соответствует номинальным данным двигателя по времени работы t_p и мощности P_k . Предполагается, что двигатель при номинальной нагрузке $P_{кн}$ за каталожное время — 10, 30, 60 и 90 мин (нормированное) нагревается до допустимой температуры.

$$\Theta_{\text{доп}} = \frac{\Delta P_{\text{кн}}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{п кат}}}{T_n}} \right). \quad (7.34)$$

Если нагрузка $P_k \neq P_{\text{кн}}$ и время работы $t_p \neq t_{\text{п кат}}$, то в течение реального времени $t_p \neq t_{\text{п кат}}$ температура также не должна превышать допустимого значения.

$$\Theta_{\text{доп}} = \frac{\Delta P_k}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}} \right). \quad (7.35)$$

Отношение потерь

$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_{\text{кн}}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{\text{п кат}}}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}} = \frac{a + \frac{P_k}{P_{\text{кн}}}}{1 + a}, \quad (7.36)$$

откуда получим отношение мощностей

$$P_k = P_{\text{кн}} \sqrt{\frac{(1 + a) \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{п кат}}}{T_n}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}} \right)}}, \quad (7.37)$$

где $P_{\text{кн}}, \Delta P_{\text{кн}}$ — номинальные мощность и потери в режиме S2 при нормированном (каталожном) времени t_p .

Если мощность по (7.37) больше эквивалентной мощности $P_э$, то двигатель будет работать в номинальном тепловом

режиме. Аналогичные (7.37) расчетные формулы могут быть получены для допустимого момента M_{κ} или тока I_{κ} .

Пример 7.1. Выбрать асинхронный двигатель серии 4А для работы в кратковременном режиме с мощностью $P_{\kappa} = 18$ кВт, длящейся в течение $t_p = 20$ мин. Постоянная времени нагрева $T_n = 1$ час. Момент на валу не зависит от скорости.

Решение. По формуле (7.29) находим коэффициент термической перегрузки

$$p_T = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{20}{60}}} = 3,55.$$

Коэффициент механической перегрузки по (7.30)

$$p_M = \sqrt{(1+a) \cdot p_T - a} = \sqrt{(1+0,5) \cdot 3,55 - 0,5} = 2,2,$$

где $a = 0,5$ — коэффициент потерь, $a = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_v}$.

Мощность двигателя

$$P_d = \frac{P_{\kappa}}{p_M} = \frac{18}{2,2} = 8,2 \text{ кВт}.$$

Ближайший больший по мощности асинхронный двигатель 4А132М-4УЗ, $P_n = 11$ кВт, $n_n = 1460$ об/мин, $M_m^* = 3,0$; $M_{\Pi}^* = 2,2$.

Двигатель необходимо проверить по механической перегрузке и условиям пуска:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{11000 \cdot 30}{\pi \cdot n_n} = 72 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_m = M_m^* \cdot M_n = 3,0 \cdot 72 = 216 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\Pi} = M_{\Pi}^* \cdot M_n = 2,2 \cdot 72 = 158,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент сопротивления механизма

$$M_c = \frac{P_{\kappa}}{\omega} = \frac{18000 \cdot 30}{\pi \cdot n} = 117,8 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_{\Pi}.$$

Таким образом, выбранный двигатель обеспечивает пуск даже при снижении напряжения до 10%.

7.5. ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Основными показателями режима работы S3 являются момент M на рабочих участках t_p , продолжительность интервалов работы t_p и паузы t_0 , величина относительной продолжительности включения (см. рис. 7.4)

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_0} = \frac{t_p}{t_{ц}}; \text{ПВ}\% = \varepsilon \cdot 100\%. \quad (7.38)$$

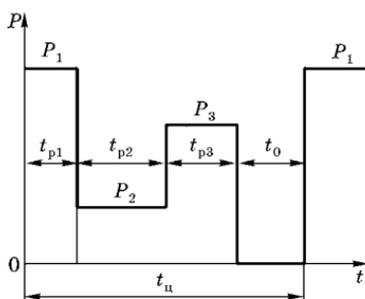


Рис. 7.8

График переменной нагрузки для повторно-кратковременных режимов

К стандартному режиму нагрузки сводятся и более сложные, многоступенчатые графики (рис. 7.8), построенные путем расчета эквивалентных величин — момента, тока, мощности как

$$P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi}}}, \quad (7.39)$$

где n — число ступеней нагрузки; для графика, изображенного на рис. 7.9, $n = 3$; P_i — мощность (момент или ток) на отдельном участке цикла.

Для режима S3 выпускаются специальные серии двигателей. В каталогах указывается номинальная мощ-

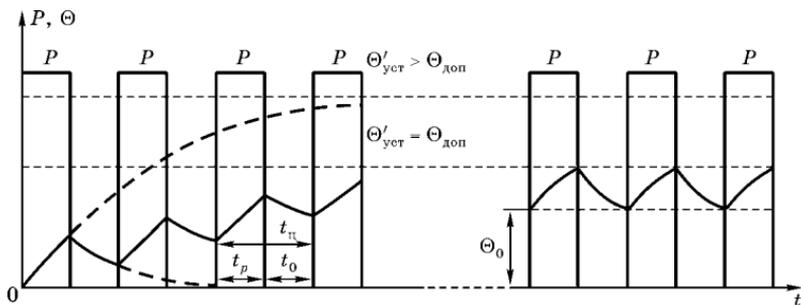


Рис. 7.9

Изменение температуры двигателя при регулярном графике режима S3

ность P_n для стандартной продолжительности включения ПВ = 15, 25, 40 и 60%. При этом длительность цикла $t_{ц} \leq 10$ мин.

Если мощность и ПВ по нагрузочной диаграмме равны или близки к номинальным, то проверка двигателя по нагреву не требуется.

Для достаточно удаленного от начала работы цикла колебания температуры устанавливаются (рис. 7.9) $\Theta_{\max} = \Theta_{\text{уст}} = \Theta_{\text{доп}}$ и $\Theta_{\min} = \Theta_0$.

Если постоянные времени нагрева и остывания равны, например при независимой вентиляции, то зависимости превышений температуры

$$\Theta_{\text{уст}} = \Theta'_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}} \right) + \Theta_0 e^{-\frac{t_p}{T_n}}, \quad (7.40)$$

$$\Theta_0 = \Theta_{\text{уст}} e^{-\frac{t_0}{T_n}}, \quad (7.41)$$

где $\Theta'_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{A}$ — установившееся значение превышения температуры при работе в режиме S1 мощностью P и потерями ΔP (рис. 7.9); $\Theta_{\text{уст}} = \Theta_{\text{доп}}$ — допустимое превышение температуры.

Подставив (7.41) в (7.40), получим коэффициент термической перегрузки, как и в режиме S2 (см. 7.4).

$$P_T = \frac{\Theta'_{\text{уст}}}{\Theta_{\text{уст}}} = \frac{1 - e^{-\frac{(t_p+t_0)}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n \cdot \varepsilon}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}}. \quad (7.42)$$

Выбор двигателей, предназначенных для продолжительного режима работы, но используемых в повторно-кратковременном, основан на анализе теплового состояния двигателя в интервалы работы t_p и паузы t_0 . При допущении $T_n = T_0$ и, пренебрегая постоянными потерями ΔP_c , получаем:

$$M_{S1} = M_{S3} \sqrt{\varepsilon}; \quad I_{S1} = I_{S3} \sqrt{\varepsilon}; \quad P_{S1} = P_{S3} \sqrt{\varepsilon}. \quad (7.43)$$

Если в реальном цикле ε отличается от нормативной ε_n , то должно соблюдаться условие

$$\frac{\Delta P_1 \cdot t_{p1}}{t_{p1} + t_{01}} \leq \frac{\Delta P_n \cdot t_{pn}}{t_{pn} + t_{0n}}. \quad (7.44)$$

или

$$\Delta P_1 \cdot \varepsilon_1 \leq \Delta P_n \cdot \varepsilon_n,$$

где ΔP_1 — средние потери по нагрузочным диаграммам.

Из (7.44) получены формулы пересчета

$$\begin{cases} P_{0,15} = P_\varepsilon \sqrt{\frac{\varepsilon}{0,15}}; & P_{0,25} = P_\varepsilon \sqrt{\frac{\varepsilon}{0,25}}; \\ P_{0,4} = P_\varepsilon \sqrt{\frac{\varepsilon}{0,4}}; & P_{0,6} = P_\varepsilon \sqrt{\frac{\varepsilon}{0,6}}; & P_{1,0} = P_\varepsilon \sqrt{\varepsilon}, \end{cases} \quad (7.45)$$

где P_ε , ε — мощность и относительная продолжительность включения по реальной диаграмме нагрузки.

Пример 7.2. Выбрать двигатель с ротором для режима S3 со следующими параметрами: $P_1 = 100$ кВт, $t_1 = 0,5$ мин; $P_2 = 50$ кВт, $t_2 = 3$ мин; $P_3 = 90$ кВт, $t_3 = 0,5$ мин; $t_0 = 6$ мин. Постоянная времени нагрева $T_n = 60$ мин; коэффициент ухудшения теплоотдачи во время паузы $\beta = 0,5$.

Отношение потерь $a = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_v} = 0,25$; $t_{ц} = t_p = t_0$; ПВ = 40%.

Решение по методу термической и механической перегрузки. Коэффициент термической перегрузки по (7.42)

$$p_T = \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n} - \frac{t_0}{T_0}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}} = \frac{1 - e^{-\frac{4}{60} - \frac{6}{240}}}{1 - e^{-\frac{4}{60}}} = 1,36,$$

где $t_p = t_1 + t_2 = 4$ мин; $T_0 = \frac{T_n}{\beta_0} = \frac{60}{0,25} = 240$ мин.

Механический коэффициент перегрузки (7.30)

$$p_M = \sqrt{(1+a) \cdot p_T - a} = \sqrt{(1+0,5) \cdot 1,36 - 0,5} = 1,26.$$

Эквивалентная мощность за время работы $t_p = 4$ мин.

$$\begin{aligned} P_\circ &= \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{100^2 \cdot 0,5 + 50^2 \cdot 3 + 90^2 \cdot 0,5}{0,5 + 3 + 0,5}} = \\ &= 64,5 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Необходимая мощность двигателя

$$P_d = \frac{P_{\Sigma}}{p_m} = \frac{64,5}{1,26} = 51 \text{ кВт.}$$

Ближайший больший по мощности двигатель:

4АК2508В4УЗ, $P_n = 55 \text{ кВт}$, $n_0 = 1500 \text{ об/мин}$;

$$M^* = \frac{M_m}{M_n} = 3, \quad n = 1470 \text{ об/мин.}$$

Наибольший момент по диаграмме нагрузки при $P_1 = 100 \text{ кВт}$.

$$M_1 = \frac{P_1}{\omega_n} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 30}{\pi \cdot 1470} = 650 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Максимальный момент двигателя

$$M_m = 3 \cdot M_n = 3 \cdot \frac{55 \cdot 10^3 \cdot 30}{\pi \cdot 1470} = 1072 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Следовательно, выбранный двигатель удовлетворяет и по условиям перегрузки.

7.6. ДОПУСТИМАЯ ЧАСТОТА ВКЛЮЧЕНИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Известно, что при пуске АД с короткозамкнутым ротором (КЗР) пусковой ток $I_n = (4,4 \div 7)I_n$. Поэтому при большой частоте включений потери в переходных процессах вызывают интенсивный нагрев машины, следовательно, число включений в единицу времени должно быть ограничено. Или, что то же самое, на практике возникает задача определения минимально допустимой длительности цикла $t_{\text{ц,доп}}$ в режиме S3, при которой превышение температуры не выше предельного значения. Особенно важна эта проблема для АД с КЗР, когда все потери энергии выделяются внутри объема самой машины и в большей степени — в обмотках. Допустимым считается такое число h включений в час, при котором среднее превышение температуры будет равно предельному.

Пусть рабочий цикл состоит из времени пуска t_n , работы $t_{\text{уст}}$ при установившейся скорости ω_n и $M_c = \text{const}$,

торможения t_T и паузы t_0 (рис. 7.10), время цикла $t_{\text{ц}} = t_{\text{п}} + t_{\text{уст}} + t_T + t_0$.

Потери энергии, выделяющиеся за цикл в двигателе, состоят из потерь энергии при пуске $\Delta W_{\text{п}}$, торможении ΔW_T и работе с установившейся скоростью $-\Delta W_{\text{уст}} = \Delta P t_{\text{уст}}$. При этом в окружающую среду выделяется: за время $t_{\text{уст}} \Delta W_{\text{уст}} = \Delta P_{\text{н}} t_{\text{уст}}$; за время паузы $\Delta W_0 = \beta_0 \Delta P_T t_0$, где β_0 — коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе;

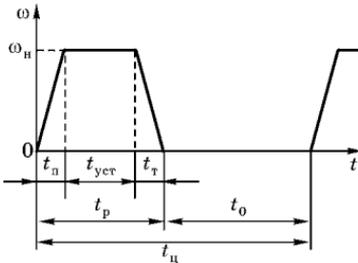


Рис. 7.10

Диаграмма изменения скорости двигателя при определении допустимой частоты его включений

за время пуска и торможения $\Delta W_{\text{пт}} = \Delta P_{\text{н}} (t_{\text{п}} + t_T) \frac{1 + \beta_0}{2}$

(коэффициент ухудшения теплоотдачи принят равным среднему между начальным и конечным значениями). Следовательно, при равенстве тепловыделения и теплоотдачи можно записать

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{п}} + \Delta W_{\text{уст}} + \Delta W_T &= \\ &= \Delta P_{\text{н}} (t_{\text{п}} + t_T) \frac{1 + \beta_0}{2} + \Delta P_{\text{н}} t_{\text{уст}} + \beta \Delta P_{\text{н}} \cdot t_0. \end{aligned} \quad (7.46)$$

Для АД с КЗР при пусковых и тормозных токах $I_{\text{п}} = (5 \div 7) I_{\text{н}}$ число включений в час [3, 4, 5]

$$h \cong 3600 \frac{(\Delta P_{\text{н}} - \Delta P) \varepsilon + \Delta P_{\text{н}} \beta_0 (1 - \varepsilon)}{\Delta W_{\text{п}} + \Delta W_T}. \quad (7.47)$$

При работе двигателя при $\omega = \omega_{\text{н}}$ с номинальной нагрузкой $P_{\text{н}}$ (и потерями $\Delta P_{\text{н}}$) (7.47) упрощается

$$h = 3600 \frac{\Delta P_{\text{н}} \cdot \beta_0 (1 - \varepsilon)}{\Delta W_{\text{п}} + \Delta W_T}. \quad (7.48)$$

При этом значения $\Delta P_{\text{н}}$, $\Delta W_{\text{п}}$ и ΔW_T определяются по формулам главы 6.

Из (7.47) видно, что допустимая частота включений тем больше, чем меньше $\Delta P_{\text{н}}$, $\Delta W_{\text{п}}$ и ΔW_T .

В зависимости от продолжительности включения величина h представляется более сложной зависимостью:

определяется это разностью ($\Delta P_{\text{н}} - \Delta P$), с одной стороны, и $\beta_0 \Delta P_{\text{н}}$ — с другой, т. е. между тепловыделением и теплоотдачей.

Увеличение допустимого числа включений может быть достигнуто использованием независимой вентиляции ($\beta = 1$), уменьшением потерь энергии $\Delta W_{\text{п}}$ и $\Delta W_{\text{т}}$, применением, например, частотного регулирования. На практике применяются электроприводы с числом включений в час до 1000 и более.

Пример 7.3. ДПТ независимого возбуждения работает с номинальным моментом нагрузки по графику скорости, показанному на рис. 7.2, со следующими характеристиками: $t_{\text{п}} = 0,4$ с, $t_{\text{уст}} = 26$ с, $t_{\text{т}} = 0,3$ с, $t_0 = 50$ с. Суммарный приведенный момент инерции $J = 0,12$ кг·м².

Паспортные данные двигателя приведены в примере в 7.1. Требуется определить допустимое число включений в час.

Используя формулу (7.48), определим входящие в нее величины. Номинальные потери

$$\Delta P_{\text{п}} = \frac{P_{\text{н}}(1 - \eta_{\text{н}})}{\eta_{\text{н}}} = \frac{2200 \cdot (1 - 0,77)}{0,77} = 657 \text{ Вт.}$$

1. Относительная продолжительность включения

$$\varepsilon = \frac{t_{\text{п}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{0,4 + 26 + 0,3}{0,4 + 26 + 0,3 + 50} = 0,35; \text{ ПВ} = 35\%.$$

2. Определим потери энергии при пуске $\Delta W_{\text{п}}$ и торможении $\Delta W_{\text{т}}$. Потери при пуске и торможении вхолостую

$$\Delta W_{\text{п0}} = \Delta W_{\text{т0}} = \frac{J \omega_0^2}{2} = \frac{0,12 \cdot 120^2}{2} = 864 \text{ Дж.}$$

При пуске и торможении под нагрузкой — по формулам (6.49), (6.52). При этом средний момент, приближенно, при $\varepsilon = \text{const}$

$$M_{\text{ср}} \approx \frac{J \cdot \omega_{\text{н}}}{t_{\text{п}}} + M_{\text{с}} = \frac{0,12 \cdot 105}{0,4} + 21 = 52,2 \text{ Н·м.}$$

Тогда потери энергии при пуске и торможении с нагрузкой

$$\Delta W_{\Pi} = \frac{M_{\text{ср}}}{M_{\text{ср}} - M_{\text{с}}} \cdot \Delta W_{\Pi 0} = \frac{52,5}{52,5 - 21} \cdot 864 = 1440 \text{ Дж};$$

$$\Delta W_{\text{T}} = \frac{M_{\text{ср}}}{M_{\text{ср}} + M_{\text{с}}} \cdot \Delta W_{\text{T}0} = \frac{52,5}{52,5 + 21} \cdot 864 = 617 \text{ Дж.}$$

Допустимое число включений, при $\beta = 0,5$

$$h = 3600 \frac{\Delta P_{\Pi} \cdot \beta_0 (1 - \varepsilon)}{\Delta W_{\Pi} + \Delta W_{\text{T}}} = 3600 \frac{657 \cdot 0,5 (1 - 0,35)}{1440 + 617} = 747 \frac{\text{ВКЛ.}}{\text{Ч.}}$$

Таким образом, по условиям нагрева двигатель может быть включен 747 раз в течение часа. Заметим, что длительность цикла $t_{\text{ц}} = 76,7$ с, и по условиям работы

$$h' = \frac{3600}{76,7} = 47 \frac{\text{ЦИКЛОВ}}{\text{Ч.}}$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем ограничена нагрузка электрической машины, трансформатора?
2. Какие основные режимы работы двигателей определены стандартом по характеру нагрузочной диаграммы?
3. Что такое постоянная времени нагрева двигателя и от чего он зависит?
4. Какие основные методы проверки двигателей по нагреву?
5. Дайте определения режимов работы S1, S2, S3.
6. Дайте определение коэффициентов термической и механической перегрузки двигателей?
7. По каким параметрам проверяется выбранный асинхронный двигатель?
8. Как изменяется загрузка двигателя в режиме S2 при уменьшении времени работы t_p ?
9. При каких соотношениях времени работы t_p и постоянной времени нагрева T_n проверка по теплу может не проводиться?



ХАРАКТЕРИСТИКИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

8.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МАШИН ПО ПРИВОДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

В сельском хозяйстве, как ни в какой другой отрасли производства, используются машины и механизмы различных типов и назначения, отличающиеся видом и параметрами движения исполнительного органа, мощностью первичного двигателя, условиями и режимами работы, видом приводных характеристик: технологических, нагрузочных, энергетических, механических, пусковых, инерционных [5, 11, 41, 45, 51]. Разнообразие машин и механизмов определяет широкий спектр типов приводов, которые должны отвечать предъявляемым к рабочим машинам требованиям по указанным выше характеристикам. При этом постоянно расширяется сфера использования электропривода, в большинстве своем автоматизированного регулируемого, в силу известных преимуществ перед другими типами приводов (гидравлический, пневматический, механические вариаторы и др.). Особенно следует отметить животноводческие и птицеводческие фермы, системы тепло- и водоснабжения, орошения, приготовления и раздачи кормов, хранения и первичной переработки продукции. В системах электропривода управление технологическими процессами и режимами работы производится регулированием координат электродвигателя — скорости, тока, момента, перемещения (см. главу 1).

Сельское хозяйство является крупным потребителем энергии различных видов: электрической, тепловой, химической (топливо). При этом энергоемкость продукции отечественного сельского хозяйства существенно выше

этого показателя у зарубежных производителей, отсюда и низкая конкурентоспособность, высокая доля импорта. Следовательно, повышение эффективности использования энергии путем снижения непроизводительных потерь, внедрением энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования остается актуальной задачей для всей производственной сферы, в том числе сельскохозяйственной.

Электрифицированные сельскохозяйственные агрегаты можно разделить на несколько групп, обладающих сходными характеристиками и режимами работы:

- центробежные механизмы: центрифуги, насосы систем водоснабжения и вакуумные, вентиляторы, турбокомпрессоры;
- установки с кривошипно-шатунным механизмом: поршневые насосы и компрессоры, прессы сена и соломы, лесопильные рамы, некоторые вибромеханизмы;
- подъемно-транспортные машины: циклического (грузоподъемные краны) и непрерывного действия (ленточные, ковшовые, шнековые транспортеры для сыпучих грузов, раздачи кормов, уборки навоза);
- машины первичной переработки продуктов и приготовления кормов: зернодробилки, измельчители, смесители, грануляторы, теребильные, сортировальные и др.;
- кормораздатчики: мобильные, монорельсовые и др.;
- электрифицированный ручной инструмент: дрели, вибраторы, гайковерты, ударные инструменты, электрорубанки и др.

Центробежные механизмы обладают низким моментом трогания, вентиляторной механической характеристикой (см. 2.4), повышенным моментом инерции и спокойной нагрузкой в установившихся режимах. Особое место занимают здесь центрифуги с большим приведенным моментом инерции и частотой вращения до 12 000 об/мин. Следствием этого являются тяжелые условия пуска.

Установки с кривошипно-шатунным механизмом имеют зависящий от угла поворота вала момент трогания, нагрузка носит изменяющийся периодический характер. Такие механизмы снабжаются, как правило, дополнительными инерционными элементами — маховиками.

Большинство подъемно-транспортных машин обладают высоким моментом трогания, достаточно низким приведенным моментом инерции (кроме приводов мостов кранов). Для транспортеров с длинными лентами, цепными и зубчатыми промежуточными передачами характерны динамические перегрузки при пусках (выбор зазоров, натяжение ленты), поэтому приходится принимать меры по снижению пускового момента.

Кормоприготовительные машины имеют, как правило, несколько рабочих органов: транспортирующие, режущие, дробящие, прессующие, смешивающие, трясущие и т. д. В результате у них высокие моменты трогания и инерции, нагрузка носит случайно-переменный характер. Частота и размах колебаний нагрузки зависят от физико-механических свойств и степени неоднородности обрабатываемого материала, частоты вращения рабочих органов, производительности и способа загрузки.

На рис. 8.1 приведены характерные для сельскохозяйственных машин графики нагрузки, а в табл. 8.1 — соответствующий им перечень машин и значение коэффициента неравномерности нагрузки.

По виду механических характеристик $\omega(M)$ сельскохозяйственные механизмы классифицируются, в основном, подобно описанному в 2.4.

По значению момента трогания машины делятся на три группы [5, 46] (см. табл. 8.2).

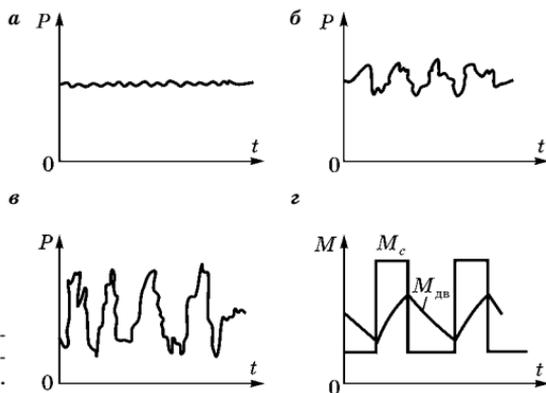


Рис. 8.1

Примерные графики нагрузки на рабочих органах сельскохозяйственных машин:

a — постоянная; *б* — слабопеременная; *в* — резкопеременная; *з* — ударная.

Таблица 8.1

Классификация машин по виду нагрузочных диаграмм

Вид диаграмм	Примерный график	$K_p = \frac{P_{ср кв}}{P_{ср}}$	Перечень машин
Постоянная	Рис. 8.1а	1,0	Центробежные насосы, центрифуги, транспортеры, подъемные механизмы, мельницы
Слабопеременная	Рис. 8.1б	1,0÷1,05	Измельчители сочных кормов, смесители, зернодробилки
Резкопеременная	Рис. 8.1в	Выше 1,05	Измельчители грубых кормов, дробилки, смесители
Ударная	Рис. 8.1г		Сеносооломопрессы, поршневые насосы и компрессоры, пилорамы

Таблица 8.2

Классификация машин в зависимости от момента трогания

$M_{тр}/M_n$	Перечень механизмов
~0,3	Вентиляторы, центробежные насосы, центрифуги, зернодробилки при пуске вхолостую
0,3÷1,0	Транспортеры, конвейеры, грузоподъемные механизмы, молотильные агрегаты при пуске вхолостую, смесители
>1,0	Дробилки и измельчители грубых кормов при пуске под нагрузкой, пилорамы, поршневые компрессоры, прессы-грануляторы

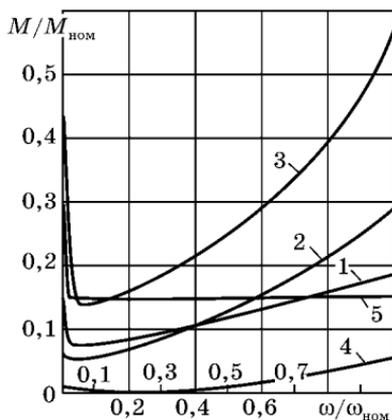


Рис. 8.2
Механические характеристики холостого хода отдельных машин:

1 — агрегат приготовления силоса; 2 — универсальные дробилки кормов; 3 — молотилка льняного вороха; 4 — молочный сепаратор; 5 — транспортер удаления навоза.

Очевидно, что реализация пусковых режимов для механизмов каждой группы должна отвечать определенным требованиям (рис. 8.2).

Так, машины первой группы допускают прямой пуск короткозамкнутых АД или при пониженном напряжении с использованием устройств плавного пуска (УПП), переключением обмоток с треугольника на звезду с целью снижения пусковых токов.

Пуск механизмов второй группы осуществляется прямым включением АД в сеть (с учетом динамических нагрузок и мощности питающей сети), а третьей группы — применением способов и средств, обеспечивающих достаточный пусковой момент.

Особо следует отметить влияние момента инерции механизма на время пуска, а следовательно, и на потери энергии и нагрев обмоток двигателя.

В сельскохозяйственных машинах и механизмах коэффициент инерции (отношение приведенного момента инерции к моменту инерции двигателя) имеет значения (3÷5) у насосов, транспортеров, норий; до 15 и более у зернодробилок и вентиляторов; до 1000 и более у сепараторов и центрифуг.

8.2. ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ АГРЕГАТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Большинство сельскохозяйственных машин работают в режиме S1 и S2, меньше — в режиме S3. При этом нагрузка, как правило, является переменной, а размах ее колебаний зависит от типа механизма (табл. 8.1). Так, продолжительный режим S1 характерен для дробилок, измельчителей, некоторых насосов, вентиляторов, центрифуг, компрессоров при постоянном расходе.

В кратковременном режиме S2 работают раздатчики кормов на фермах, навозоуборочные транспортеры, порционные смесители кормов, некоторые насосные и компрессорные установки. Очевидно, что продолжительность

работы механизма определяется технологическими характеристиками (стандартные $t_p = 10, 30, 60, 90$ мин).

В повторно-кратковременном режиме S3 работают крановые механизмы, вентиляторы в системах микроклимата, насосы систем водоснабжения при определенных режимах потребления, компрессоры с ресиверами, большинство ручного инструмента и др.

Электрифицированные агрегаты сельскохозяйственного производства работают зачастую в тяжелых условиях колебания температуры, влажности, запыленности и наличия в окружающей среде химических реагентов: аммиака, сероводорода, углекислого газа, что характерно для помещений животноводческих и птицеводческих ферм (см. Приложение).

Указанные явления сокращают срок службы изоляции, следовательно, и ресурс электрооборудования. В помещениях с повышенной запыленностью ухудшаются условия теплоотдачи с поверхности корпуса электрических машин, что влечет повышение температуры отдельных частей и, прежде всего, проводников обмоток выше допустимых значений.

Большое влияние на надежность, долговечность и технологические характеристики оборудования оказывает качество электроэнергии. Для сельскохозяйственных потребителей характерны: использование приемников с различными характеристиками, высокие однофазные нагрузки, неравномерность загрузки оборудования. Указанные явления при большой протяженности и низкой пропускной способности сетей, свойственных сельским территориям, приводят к колебаниям напряжения, отклонениям выше нормативных, несимметрии и несинусоидальности (см. главу 4). Как следствие, снижение моментов асинхронных двигателей (пусковых особенно), повышение потребляемых токов, дополнительные потери и в итоге — нагрев обмоток и преждевременный выход из строя двигателей.

Поэтому при выборе двигателей необходим тщательный учет режимов и условий работы электрифицированных агрегатов.

8.3. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ МАШИН СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Общая методика выбора электродвигателя по мощности изложена в главе 7. Электропривод должен обеспечивать выполнение заданного технологического процесса, поэтому к нему предъявляется ряд специфических требований [5, 45].

Мощность электродвигателя должна быть достаточной для преодоления момента сопротивления при понижении напряжения питания на 7,5%. При этом главным остается условие: температура обмоток не должна превышать предельную допустимую температуру изоляции.

Начальный пусковой момент должен быть достаточным для преодоления момента сопротивления троганию при снижении напряжения до 30%.

Перегрузочная способность двигателя должна обеспечивать статическую и динамическую устойчивость работы привода при характерных для данной рабочей машины повышениях момента сопротивления и снижении питающего напряжения до 10% номинального.

Электродвигатели должны допускать кратковременную работу до 10 минут с номинальной нагрузкой при напряжении до 0,8 номинального и длительную — со снижением мощности до 0,8 номинальной.

Электрический привод должен быть рассчитан для работы при температуре от -40 до $+40^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $95\pm 3\%$ при $+20^{\circ}\text{C}$.

Электроприводы животноводческих и птицеводческих ферм должны быть рассчитаны на работу при повышенном содержании в воздухе химических реагентов (см. табл. 8.3).

В запыленных помещениях (содержание пыли $\sim 1,3 \text{ г/м}^3$) (склады и хранилища кормов, скотные дворы и птичники, кормоприготовительные цехи, мукомольные установки и др.) двигатели должны быть рассчитаны для соответствующих условий.

Для некоторых машин в сельском хозяйстве нагрузка носит случайный характер, зависит от вида перерабатываемого материала, структуры, состояния и установки

Т а б л и ц а 8.3

**Расчетные условия работы электроприводов
в животноводческих и птицеводческих помещениях**

Факторы среды	Количество
Присутствие в воздухе химических реагентов, г/м ³ , не более	
аммиака:	
длительно	0,03
кратковременно в течение 5 часов в сутки	0,09
сероводорода:	
длительно	0,03
кратковременно	0,08
углекислого газа:	
длительно	7,8
кратковременно	14,7

рабочих органов, подачи и т. д. Прежде всего, это: дробилки, измельчители кормов, корнеклубнерезки (см. рис. 8.1). Для таких машин нагрузочная диаграмма для предварительного выбора двигателя не может быть построена. Используется среднее за рабочий цикл значение мощности, которое определяется по аналитическим выражениям с учетом конструктивных параметров машины и свойств обрабатываемого материала или по эмпирическим формулам, полученным на основе экспериментальных исследований энергоемкости процесса в зависимости от различных изменяющихся факторов.

Следует отметить, что эмпирические формулы отражают лишь существующие на данный момент тип оборудования и технологию. В главах 9–14 используются результаты эксплуатации оборудования, взятые из справочников и монографий, изданных в период 1986–2008 гг.

9 ЭЛЕКТРОПРИВОД ЦЕНТРИФУГ

9.1. ОСОБЕННОСТИ ПРИВОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРИФУГ

В сельскохозяйственном производстве центрифуги применяются в технологическом процессе обработки и переработки молока (сепараторы) (см. рис. 9.1), для сушки и очистки технических масел, в системах гидроудаления навоза.

Процесс центрифугирования основан на использовании центробежных сил при вращении барабана центрифуги с частотой (6000÷10 000 об/мин). Под действием этих сил в системе тарелок барабана происходит разделение жидкости на фракции с различной плотностью. По технологическим требованиям процесс ведется с постоянной скоростью, величина которой в определенной степени зависит от количества исходного материала. Следовательно, электропривод центрифуги должен обладать жесткими механическими характеристиками, как естественными, так и искусственными.

Момент сопротивления центрифуги может быть выражен как [5, 46, 51]

$$M_c = M_{co} + K_c \cdot \omega^2, \quad (9.1)$$

где M_{co} — момент трогания центрифуги, $M_{co} \approx 0,3M_H$ (в некоторых справочниках приводится значение $M_{co} = 0,2 \div 0,3$ Н·м); ω — угловая скорость барабана; K_c — коэффициент пропорциональности $K_c \approx 1 \cdot 10^{-6}$ [5].

Момент сопротивления центрифуги обусловлен силами трения в подшипниках, в передаче, о воздух, а также механическими колебаниями системы.

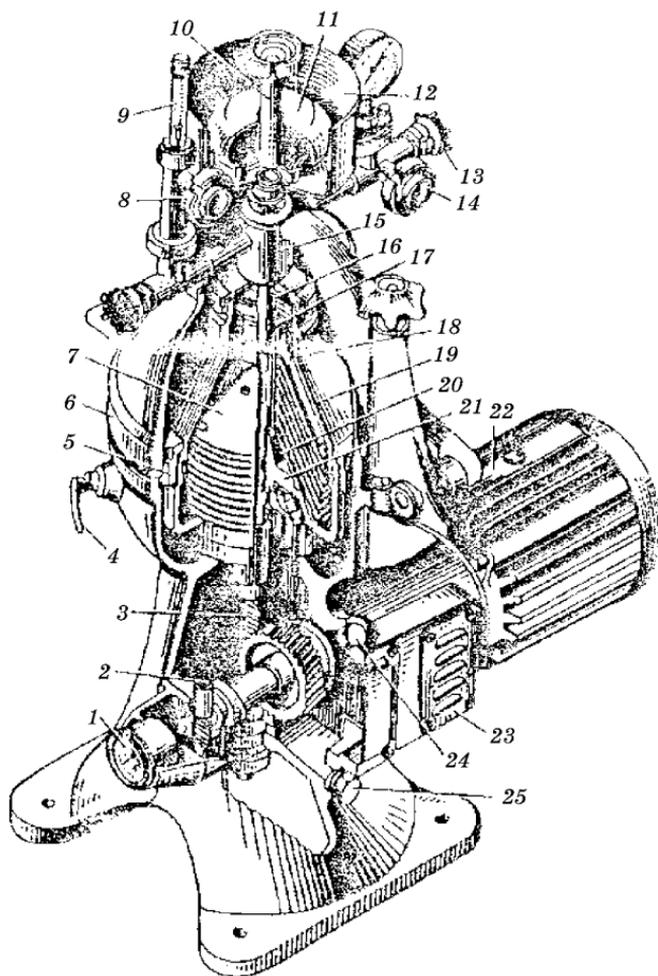


Рис. 9.1
Сепаратор СІМФ-2000:

1 — тахометр; 2 — счетчик оборотов; 3 — веретено; 4 — тормоз; 5 — затяжная гайка; 6 — крышка корпуса; 7 — разделительная тарелка; 8 — выходной патрубок для сливок; 9 — сливкометр; 10 — трубка подачи молока; 11 — поплавок; 12 — поплачковая камера; 13 — регулятор обраты; 14 — поплавок вывода; 15 — выводное устройство; 16 — напорный диск обезжиренного молока; 17 — напорный диск сливок; 18 — пакет тарелок; 19 — крышка барабана; 20 — тарелкодержатель; 21 — основание барабана; 22 — электродвигатель; 23 — крышка камеры фрикционной муфты; 24 — отверстие для заливки масла; 25 — винт подпятника.

На рис. 9.2 показаны теоретическая (пунктир) и экспериментальная (сплошная линия) механические характеристики центрифуги и желаемая характеристика двигателя (M). Всплески момента сопротивления вызваны явлением механического резонанса из-за неполной механической балансировки барабана. Очевидно, что эти всплески не являются обязательными, их величина зависит от качества балансировки.

Рабочая точка на механической характеристике должна находиться вне зоны резонансных явлений, работа в зоне резонанса недопустима. Наибольшего значения достигает первый резонансный всплеск (M_{p1}), поэтому во время пуска должно выполняться условие

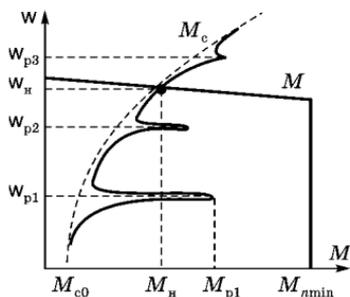


Рис. 9.2
Механическая характеристика центрифуги

$$M_{n \min} > M_{p1}. \quad (9.2)$$

При этом величина M_{p1} определяется опытным путем, для конкретного исполнения центрифуги.

Расчетная мощность, необходимая для привода центрифуги в установившемся режиме,

$$P_{сн} = h \cdot M_{сн} \cdot \omega_n, \quad (9.3)$$

где h — коэффициент, учитывающий гидродинамические и другие потери; $h = 1,2 \div 2$ [51].

Режим работы центрифуг в большинстве случаев является продолжительным (S1), в качестве приводного двигателя используются, как правило, короткозамкнутые асинхронные двигатели.

Основной особенностью всех центрифуг является большой приведенный к валу двигателя момент инерции барабана, превышающий момент инерции ротора двигателя до 100 и более раз. Следовательно, пуск центрифуг затяжной (до 3÷5 мин), прямой пуск недопустим, необходимо использовать дополнительное оборудование для снижения потерь в обмотках электродвигателя так, чтобы температура изоляции не превышала допустимых значений (см. главу 6).

9.2. ТИПЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЦЕНТРИФУГ

До недавнего времени практически использовались два типа электропривода центрифуг:

- а) электропривод с центробежной муфтой скольжения (или порошковой);
- б) электропривод с многоскоростным асинхронным двигателем.

Схема электропривода с муфтой скольжения представлена на рис. 9.3. Принцип его действия заключается в следующем: при включении двигателя барабан (рис. 9.4), свободно вращаясь на валу центрифуги, с помощью пальцев

увлекает колодки. Центробежные силы $F_n = \frac{mv^2}{R}$ преодолевают отжимающие силы пружинного кольца и с ростом скорости перемещают колодки в направлении рабочей поверхности ведомого шкива. При определенном значении скорости колодки входят в зацепление с барабаном, появляются сила трения $F_{тр}$ (рис. 9.4) и движущий момент на валу центрифуги. Дальнейшее увеличение скорости приводит к росту $F_{тр}$ и передаваемого момента вплоть до полного сцепления колодок и шкива.

При этом муфта (рис. 9.4) позволяет двигателю набрать скорость практически холостую до скорости сцепления, а затем постепенно принять нагрузку [51]. В таком приводе полные потери (в обмотках и муфте) остаются такими

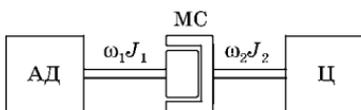


Рис. 9.3

Функциональная схема электропривода центрифуги с муфтой скольжения:

АД — асинхронный двигатель; МС — муфта скольжения; Ц — центрифуга.

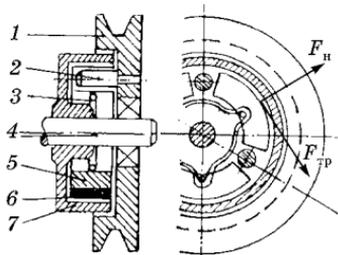


Рис. 9.4

Устройство центробежной муфты скольжения:

1 — ведущий шкив; 2 — пальцы; 3 — пружинное кольцо; 4 — вал центрифуги; 5 — колодки; 6 — накладки; 7 — ведомый барабан.

же, как и при прямом пуске (см. главу 6), но здесь потери перераспределяются между двигателем и муфтой и тем самым режим пуска облегчается. Количественно соотношение потерь в муфте и обмотке ротора зависит от скорости скольжения (сцепления) ведущей и ведомой полумуфт.

Суммарные потери в обмотке ротора за время пуска [51]:

$$\Delta W_{\text{п2}} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} (2s_{\text{сц}} - s_{\text{сц}}^2), \quad (9.4)$$

где J — приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции; ω_0 — синхронная угловая скорость двигателя, $s_{\text{сц}}$ — скольжение сцепления.

Потери энергии в муфте [51]:

$$\Delta W_{\text{м}} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} (1 - s_{\text{сц}}^2)^2. \quad (9.5)$$

Очевидно, что сумма потерь энергии в обмотке ротора и муфте равна общим пусковым потерям в роторе при прямом пуске (см. главу 6)

$$\Delta W_{\text{п2}} + \Delta W_{\text{м}} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2}. \quad (9.6)$$

Таким образом, выбирая скольжение сцепления путем настройки пружинного механизма (рис. 9.4), возможно оптимизировать потери в роторе во избежание недопустимого превышения температуры. Так, для распределения потерь поровну между обмоткой и муфтой скольжение $s_{\text{сц}} = 0,3$, т. е. оно близко к критическому скольжению двигателя по характеристике $\omega(M)$ или $M(s)$. Отметим, что снижение потерь энергии в обмотке ротора приводит к их уменьшению и в обмотке статора [3, 4], которые равны

$$\Delta W_{\text{п1}} = \Delta W_{\text{п2}} \cdot \frac{R_1}{R_2'}. \quad (9.7)$$

На рис. 9.5 построена зависимость $\Delta W_{\text{п2}}(s_{\text{сц}})$ по (9.4) в относительных единицах, где за базисную принята величина суммарных потерь в роторе и муфте, $\Delta W = \frac{J\omega_0^2}{2}$. Из условия $\Delta W^* = \Delta W_{\text{п2}}^* + \Delta W_{\text{м}}^* = 1$ следует, что ординаты под

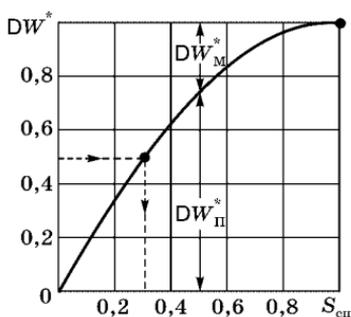


Рис. 9.5

Зависимость потерь в роторе двигателя и муфте от скольжения сцепления

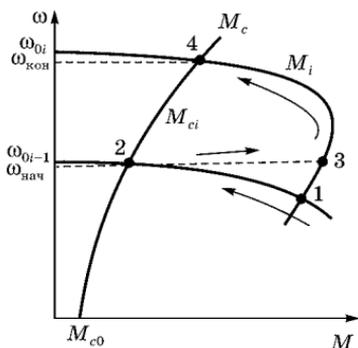


Рис. 9.6

Механические характеристики центрифуги при пуске в две ступени

кривой соответствуют относительным потерям в роторе, а над кривой — потерям в муфте.

Электроприводы центрифуг с многоскоростным асинхронным двигателем применяются до настоящего времени. Пуск механизма производится последовательным переключением двигателя на высшие ступени (меньшие числа пар полюсов) по мере разгона (рис. 9.6) [2, 3, 4, 51]. Стрелками на рисунке показано направление процесса пуска: точки 1–2–3–4. Пуск, как правило, автоматизирован. Управление производится в основном в функции времени, т. е. нет необходимости измерения скорости или тока. Достоинствами такого привода, по сравнению с приводами с центробежными муфтами, являются:

- упрощение механической части привода, так как входной вал центрифуги непосредственно соединяется с валом двигателя;
- снижение потерь энергии в обмотке ротора при пуске, которые равны [3, 4]

$$\Delta W_{n2} = \frac{J \cdot \omega_{0n}}{2n}, \quad (9.8)$$

где n — число ступеней; ω_{0n} — максимальная скорость идеального холостого хода двигателя, соответствующая последней ступени. При этом снижаются как общие потери $\Delta W_{\Pi} = \Delta W_{\Pi 1} + \Delta W_{\Pi 2}$, так и потребление энергии.

Промышленность выпускает асинхронные двигатели двух-, трех- и четырехскоростные [24, 42] серий 4А, АИР.

При этом предпочтение следует отдать двигателю с характеристикой, близкой к постоянству мощности. Опыт показывает, что в электроприводах сельскохозяйственных центрифуг для решения вопросов пуска применяются в основном двухскоростные асинхронные двигатели.

Недостатки электропривода с многоскоростными двигателями связаны с резкими колебаниями динамического момента при переключениях ступеней, что неблагоприятно сказывается на механической передаче.

Электропривод по системе преобразователь частоты — асинхронный двигатель (рис. 9.7) (см. главы 4, 6) представляется наиболее перспективным по всем основным показателям:

- возможность пуска при постоянном моменте (или токе) за вполне определенное время, с минимальными дополнительными потерями;
- возможность регулирования скорости в широких пределах (для некоторых типов центрифуг).

При питании от сети переменного тока (U, f) преобразователь выдает на выходе регулируемые напряжение и частоту (U_2, f_2). Постоянство пускового момента и ускорения обеспечивает закон регулирования $U_2 = f_2 = \text{const}$ с $I \times R$ -компенсацией. При этом пуск автоматизирован, а темп изменения U_2 и f_2 регулируется в зависимости от времени пуска с помощью задатчика интенсивности (ЗИ).

Подробно материал по частотно-регулируемому асинхронному электроприводу изложен в главах 4, 5, 6.

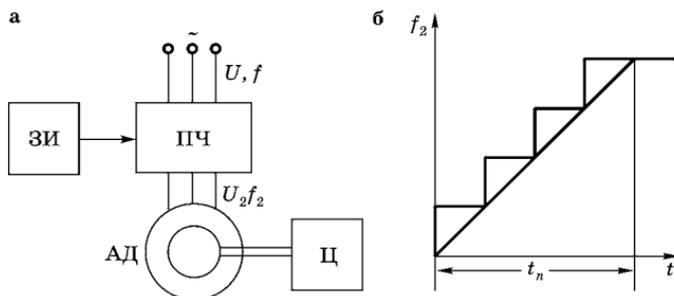


Рис. 9.7

Функциональная схема частотного электропривода и изменение частоты на выходе

9.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ

Мощность электродвигателя для привода центрифуги в установившемся режиме определяется из условия

$$P_n \geq P_{сн}, \quad (9.9)$$

где $P_{сн}$ определяется по (9.3).

Выполнение этого условия является необходимым, но недостаточным. Наиболее напряженным в тепловом отношении является режим пуска, поэтому необходима проверка по условиям нагрева именно в этом режиме. При этом важным представляется знание теплового запаса и возможности повторного пуска.

Нагрев электродвигателя при пуске (в основном обмоток) протекает чрезвычайно интенсивно по сравнению с нормальными режимами работы. Тепло практически не передается другим частям машины, и потери идут в основном на повышение температуры обмоток. При таком допущении несколько завышено значение температуры, а погрешность будет тем меньше, чем короче пуск.

Следовательно, условиями нормальной работы обмоток ротора и статора будут

$$\begin{aligned} \tau_{доп2} &\geq \frac{\Delta W_{п2}}{c_2 \cdot m_2}; \\ \tau_{доп1} &\geq \frac{\Delta W_{п1}}{c_1 \cdot m_1}, \end{aligned} \quad (9.10)$$

где $\Delta W_{п2}$, $\Delta W_{п1}$ — потери энергии при пуске в обмотках ротора и статора соответственно (см. главу 6); $\tau_{доп2}$, $\tau_{доп1}$ — допустимые значения температур обмоток ротора и статора; $\tau_{доп2} = 200^\circ\text{C}$; $\tau_{доп1}$ — определяется классом изоляции; c_2 , c_1 — удельные теплоемкости материала обмоток ротора и статора; m_2 , m_1 — массы обмоток, кг.

Наиболее слабой в тепловом отношении является обмотка статора. Необходимо отметить, что по условию (9.10) следует проверять двигатели приводов с муфтой скольжения и при переключении числа пар полюсов. В случае частотного регулирования пуск возможен при номинальном токе $I_1 = I_{1н} = \text{const}$ или допустимой перегрузке (до 20÷50%), тогда проверка по (9.10) может не производиться.

Пример 9.1. Центрифуга имеет следующие параметры: производительность — 2000 л/ч; мощность двигателя — 3,0 кВт; номинальный момент — $M_{\text{н}} = 18,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$; частота вращения ротора двигателя — $n = 1440 \text{ об/мин}$; частота вращения барабана — 7200 об/мин; передаточное отношение — $i = \frac{n_{\text{д}}}{n_{\text{б}}} = 0,2$; масса барабана — $m_{\text{б}} = 61 \text{ кг}$; диаметр барабана — $d_{\text{б}} = 0,4 \text{ м}$; момент инерции ротора — $J_{\text{р}} = 0,0086 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; момент инерции барабана — $J_{\text{б}} = 1,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; приведенный момент инерции барабана — $J^* = 30 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Задача: проверить соответствие мощности электродвигателя при разных типах электропривода: а) привод с муфтой скольжения; б) многоскоростной асинхронный электродвигатель; в) электропривод по системе ПЧ–АД.

Решение. 1. Привод с муфтой скольжения:

а) потери энергии в обмотке ротора и муфте при пуске

$$\Delta W_{\text{п2}} = \frac{J\omega^2}{2} = \frac{30 \cdot 148^2}{2} = 330000 \text{ Дж} (\omega = 148 \text{ с}^{-1}).$$

б) момент сопротивления в установившемся режиме по (9.1)

$$M_{\text{сн}} = M_{\text{с0}} + K_{\text{с}} \cdot \omega_{\text{б}}^2 = 0,2 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot 753,6^2 = 0,77 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

в) мощность двигателя (необходимая) в установившемся режиме

$$P_{\text{сн}} = h \cdot M_{\text{сн}} \cdot \omega_{\text{б}} = 1,5 \cdot 0,77 \cdot 753,6 = 870 \text{ Вт}.$$

Очевидно, что электродвигатель мощностью $P_{\text{н}} = 3,0 \text{ кВт}$ выбран по условиям пуска. Если потери энергии при пуске $\Delta W_{\text{п}} = 330000 \text{ Дж}$, то в обмотке ротора, как и в муфте

$$\Delta W_{\text{п2}} = \frac{1}{2} \cdot \Delta W_{\text{п}} = 115000 \text{ Дж} (\Delta W_{\text{м}} = 115000 \text{ Дж}).$$

В обмотке статора при $\frac{R_1}{R_2'} = (1,2 \div 1,5)$

$$\Delta W_{\text{п1}} = \Delta W_{\text{п2}} \cdot \frac{R_1}{R_2'} = 115000 \cdot 1,3 = 149500 \text{ Дж}.$$

По тепловому состоянию обмотки статора (9.10) при $m_1 = 2,8 \text{ кг}$ [24]

$$\tau = \frac{\Delta W_{\text{п1}}}{c_1 \cdot m_1} = \frac{149000}{390 \cdot 2,8} = 136^\circ\text{C} < \tau_{\text{доп}}$$

(класс изоляции F, $\tau = 155^\circ\text{C}$).

Следовательно, условиям пуска по тепловому состоянию соответствует электродвигатель мощностью 3,0 кВт, но в установившемся режиме двигатель будет недогружен.

Для двигателя мощностью $P_2 = 1,1$ кВт и том же соотношении потерь энергии в обмотках статора и ротора и $m_1 = 1,35$ кг.

$$\tau = \frac{\Delta W_{п1}}{c_1 \cdot m_1} = \frac{149000}{390 \cdot 1,35} = 283^\circ\text{C} > \tau_{\text{доп}}.$$

Следовательно, двигатель мощностью $P_2 = 1,1$ кВт не отвечает условиям пуска.

2. Пуск с использованием многоскоростного асинхронного двигателя ($2p = 8/4$).

При использовании двухскоростного асинхронного двигателя пусковые потери в обмотках снижаются в 2 раза по сравнению с прямым пуском, но при этом потери не перераспределяются, а полностью выделяются в обмотках и составляют $\Delta W_{п2} = 115\,000$ Дж и $\Delta W_{п1} = 149\,500$ Дж. Следовательно, мощность такого двигателя должна быть также близка к $P_{2н} \approx 3,0$ кВт. Например, двигатель серии 4А112МА8/4УЗ, 750/1500 об/мин, $P_{2н} = 1,9/3,0$ кВт.

3. При использовании электропривода по системе ПЧ–АД возможен пуск при номинальном моменте (и токе) или с некоторой перегрузкой (до 1, 2), поэтому мощность двигателя может быть близкой к расчетной, с некоторым коэффициентом запаса.

В таких приводах время пуска задается (до 1000 с и более) изменением темпа увеличения частоты и напряжения при соответствующем законе управления U/f . На практике указанные параметры выбираются такими, что пусковые потери снижаются в 7–8 раз по сравнению с прямым пуском.

Таким образом, выбранный по установившемуся режиму двигатель мощностью $P_{2н} = 1,1$ кВт обеспечивает частотный пуск без перегрева обмоток, работу с нагрузкой, близкой к номинальной, и высокими энергетическими показателями (η , $\cos \varphi$).

В приводе с муфтой скольжения двигатель загружен примерно на 25%, при этом КПД составляет $0,94\eta_{н}, \cos \varphi = 0,6 \cdot \cos \varphi_{н}$ [24].

В табл. 9.1 приведены основные характеристики сепараторов.

Таблица 9.1

Характеристики молочных сепараторов

Назначение и марка сепаратора	Производительность, л/ч	Количество тарелок, шт.	Частота вращения барабана, мин ⁻¹	Мощность электродвигателя, кВт	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
Сливкоотделители						
Ж5-Плава-Э	По молоку 50	11	12 000	0,06	6	326×288×480
Ж5-Плава-100	100	—	—	0,55	—	755×720×700
СМО-7-100	600	56	7560	0,6	100	—
«Урал-6»	600	45	7560	0,25	90	—
ЖЗ-ОСБ	1000	55	8000	0,55	77	755×42×700
СМПФ-2000 (с барабаном-очистителем)	2000	80	7200	2,8	330	—
Ж5-ОСЦП	3000	95	6480	7,5	428	980×615×1502
Ж5-ОС2Т-3	5000	Нет данных	6480	5,5	422	860×590×1445
ОСЗ-НС	10 000		5000	15	1440	1200×1153×1785
Очиститель молока ОЦМ-5	5000	53	6480	5,5	443	1320×880×1210
Нормализаторы-очистители						
Г-9-ОСП-3М	1000	—	7370	1,5	116	—
Ж5-ОСЦП-1	1000	—	8000	1,5	110	670×455×880
Сепараторы для высокожирных сливок						
Ж5-ОВРП-0,15	По маслу 100÷200	—	—	1,5	—	780×455×900
Ж5-ОС2Д-500	350÷1100	—	6500	6,1	450	855×655×1343

9.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ В ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРИФУГИ

В процессе работы были выполнены экспериментальные исследования потерь энергии в обмотках двигателя при пуске центрифуги от сети через автотрансформатор и при питании от преобразователя частоты. Общий вид стенда представлен на рис. 9.8. Центрифуга для очистки машинного масла имеет следующие характеристики:

- частота вращения барабана $n_6 = 7200$ об/мин;
- приведенный к валу двигателя момент инерции вращающихся масс $J = 5,92$ кг·м² (определен экспериментально методом выбега).

Асинхронный двигатель:

- тип 4А100S4У3;
- номинальная мощность $P_{2н} = 3,0$ кВт;
- номинальный ток $I_{1н} = 10,6/6,2$ А (Δ/У);
- номинальный КПД $\eta_n = 0,835$;
- номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,84$;
- относительное сопротивление статора $R_1^* = 0,078$;
- приведенное относительное сопротивление ротора $R_2'^* = 0,053$;
- номинальная скорость вращения $n_n = 1420$ об/мин.

Преобразователь частоты:

- потребляемый ток $I_{сн} = 6,3$ А;
- выходная мощность $P_{2н} = 3,0$ кВт;
- ток $I_{2н} = 7$ А;
- частота ШИМ — 4, 8, 12 кГц.

Токи измерялись амперметрами, потребляемая энергия — счетчиком, установленным перед двигателем, время — секундомером.



Рис. 9.8

Лабораторный стенд исследования процессов пуска электропривода центрифуги от преобразователя частоты и автотрансформатора

Энергетический баланс для режима пуска

$$W_1 = W_{\text{пол}} + \Delta W_{\text{п1}} + \Delta W_{\text{п2}} + \Delta W_{\text{мех}} + \Delta W_{\text{Fe}}, \quad (9.11)$$

где W_1 — потребляемая двигателем энергия за время пуска $t_{\text{п}}$; $\Delta W_{\text{п1}}$, $\Delta W_{\text{п2}}$ — потери энергии в обмотках статора и ротора, соответственно. Полезная энергия $W_{\text{пол}}$ равна запасу кинетической энергии вращающихся масс

$$\Delta W_{\text{пол}} = \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \quad (9.12)$$

где $\omega = \frac{2\pi n_{\text{н}}}{60} = \frac{2\pi \cdot 1420}{60} = 148 \text{ с}^{-1}$.

Составляющие потерь $\Delta W_{\text{мех}}$, ΔW_{Fe} не учитывались.

Расчет потерь энергии $\Delta W_{\text{п1}}$ и $\Delta W_{\text{п2}}$ при пуске через автотрансформатор проводился по формулам

$$\Delta W_{\text{п2}} = \frac{J \cdot \omega^2}{2}; \quad \Delta W_{\text{п1}} = \Delta W_{\text{п2}} \cdot \frac{R_1^*}{R_2^*}. \quad (9.13)$$

Следовательно, измерив W_1 , по известной величине $W_{\text{пол}}$ из (9.13), можно определить составляющие $W_{\text{п1}}$ и $\Delta W_{\text{п2}}$. При пуске от ПЧ последовательность определения составляющих $W_{\text{п1}}$ и $\Delta W_{\text{п2}}$ такая же, как и при питании через автотрансформатор. При времени пуска $t_{\text{п1}} = 28$ с ток $I_{\text{п1}} = 7,1 \text{ А} = \text{const}$; $t_{\text{п2}} = 48$ с ток $I_{\text{п2}} = 6,2 \text{ А}$; $t_{\text{п3}} = 90$ с ток $I_{\text{п3}} = 4,5 \text{ А}$; Установившееся значение тока $I_{\text{уст}} = 2,8 \text{ А}$, необходимая мощность двигателя $P_{2\text{уст}} \cong 1,0 \text{ кВт}$.

Результаты расчетов и опытов приведены в табл. 9.2.

Приведенные в табл. 9.2 результаты показывают, что при пуске от ПЧ потери в обмотках снизились примерно в 8 раз, а потребляемая энергия в 2,8 раза. Следовательно, для привода данной центрифуги достаточно мощности около 1,0 кВт, т. е. подходит двигатель АИР80А4, $P_{\text{н}} = 1,1 \text{ кВт}$.

Таблица 9.2

Составляющие баланса энергии	Автотрансформатор ($t_{\text{н}} = 125 \text{ с}$)		Преобразователь частоты ($t_{\text{н}} = 28 \text{ с}$)
	Расчет	Опыт	
W_1	25 3296	282 300*	108 000*
$W_{\text{пол}}$	72 960	72 960	72 960
$\Delta W_{\text{п2}}$	72 960	72 960	9200
$\Delta W_{\text{п1}}$	107 376	107 376	13 760

Примечание. * Некоторые несоответствия результатов опыта и соотношения (11) можно объяснить неучетом потерь энергии $\Delta W_{\text{мех}}$, ΔW_{Fe} .

10 ЭЛЕКТРОПРИВОД ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ И ВЕНТИЛЯТОРОВ

10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ПРИВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

Центробежные насосы и вентиляторы относятся к группе турбомеханизмов, основной особенностью которых является квадратичная зависимость статического момента сопротивления от частоты вращения механизма.

В сельском хозяйстве насосные установки используются в системах водо- и теплоснабжения производств и населения, для перекачки различных жидкостей и смесей, в системах орошения, гидроудаления навоза, в технологических процессах производства молока (от доения до переработки). Шестеренные насосы применяются в системах масло- и топливоподачи в двигателях внутреннего сгорания, в гидроприводах строительной и сельскохозяйственной техники. В Приложении (табл. 23, 24, 25) приведены характеристики некоторых из них.

Вентиляционные установки применяются в качестве воздуходувок и дымососов на теплогенерирующих предприятиях, в технологических процессах очистки, сушки зерна и сена, для поддержания нормированных параметров воздуха (микроклимата) животноводческих и птицеводческих комплексов, в помещениях для хранения и переработки сырья и т. д.

На рис. 10.1 представлены схемы устройства насосов и вентиляторов: центробежного (рис. 10.1а, в), осевого (рис. 10.1б), вихревого (рис. 10.1г), поршневого (рис. 10.1е), шестеренного (рис. 10.1д) [46]. При работе насоса всасываемая жидкость, взаимодействуя с рабочим органом, повышает свою энергию и под напором выбрасывается через

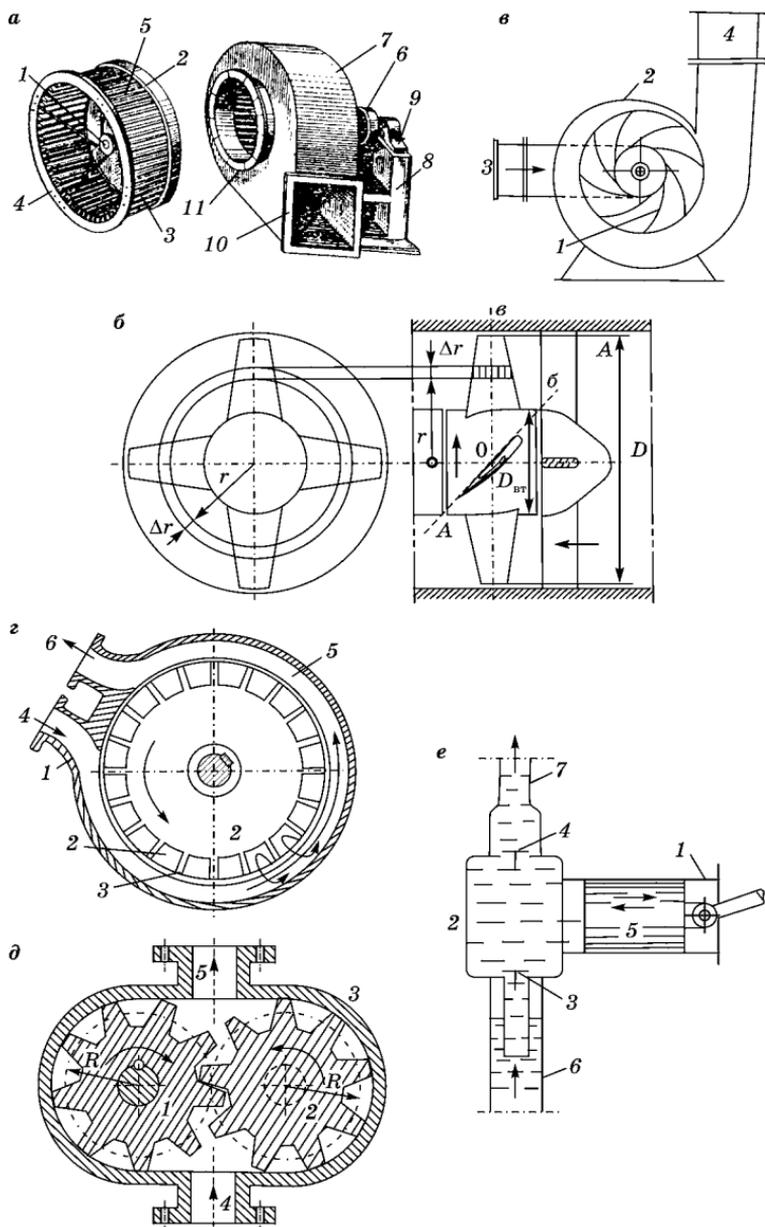


Рис. 10.1
 Конструктивные схемы вентиляторов (а, б, в); вихревого (г),
 шестеренного (д), поршневого (е) насосов

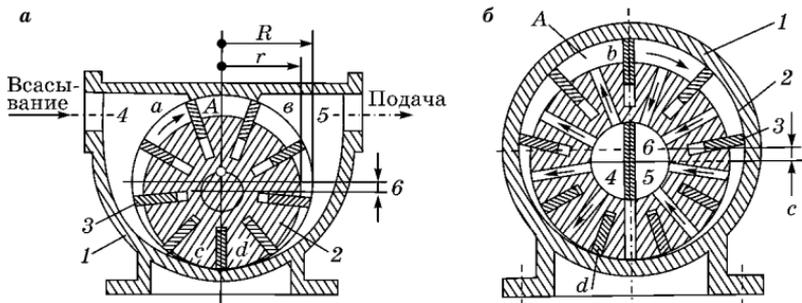


Рис. 10.2
Пластиначатый насос с внешним подводом (а)
и внутренним подводом (б)

напорный патрубок. На рис. 10.2 [47] показано устройство ротационного вакуумного насоса доильной установки, который создает разрежение в системе путем откачки воздуха (глубина вакуума ~ 50 кПа). Особенностью таких насосов является небольшой возможный предел регулирования скорости (до $0,7 \div 0,8$ от номинального значения) из-за уменьшения центробежных сил, действующих на лопатки, и, как следствие, потери вакуума.

Для подачи газовых сред используют центробежные и осевые машины (вентиляторы) (рис. 10.1а, б).

Полезная мощность турбомеханизма (насоса, вентилятора), Вт

$$P_{\text{н пол}} = Q \cdot H \cdot g \cdot \rho = Q \cdot p, \quad (10.1)$$

где Q — расход (подача), $\text{м}^3/\text{с}$; H — напор, м; p — давление, Па; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; ρ — плотность жидкости или газа, кг/м^3 .

Необходимая мощность двигателя для привода насоса

$$P_{\text{эд}} = \frac{P_{\text{н пол}}}{\eta_{\text{н}}}, \quad (10.2)$$

где $\eta_{\text{н}}$ — КПД насоса (вентилятора).

КПД насосов и вентиляторов зависит от конструкции, быстроходности, расхода и составляет [5, 46, 53]:

- центробежные одноступенчатые насосы — от 0,85 до 0,90;
- высоконапорные многоступенчатые насосы — 0,40 ÷ 0,45;
- вентиляторы центробежные — 0,40 ÷ 0,60;
- осевые вентиляторы — 0,20 ÷ 0,50.

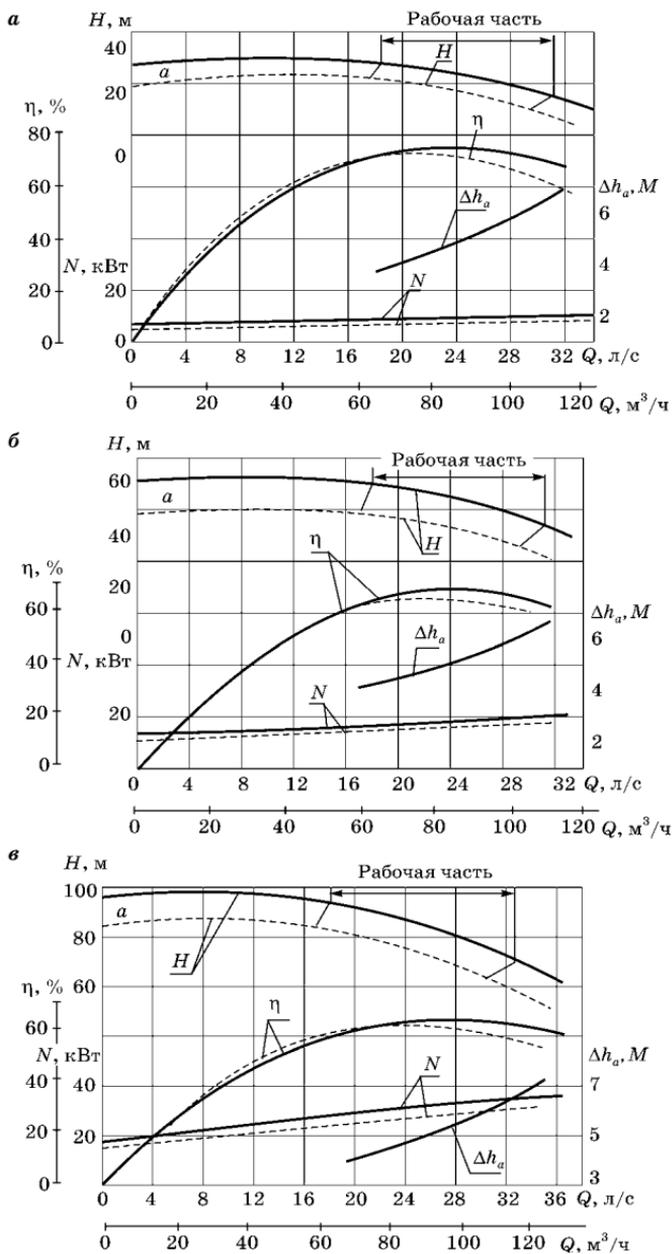


Рис. 10.3

Характеристики насосов типа К и КМ при $n = 2900$ об/мин

Из (10.1) видно, что основными параметрами насосов являются напор H , подача Q , КПД и мощность, которые зависят от угловой скорости ω . На практике в различных отраслях производства используются насосы при напоре до 3000 м и подаче до нескольких тысяч м³/ч. Быстроходность

$$n_s = \frac{3,65 \cdot n_n \sqrt{Q_n}}{H_n^{3/4}} [5]. \text{ Эти величины связаны } Q-H\text{-характеристиками, представляющими зависимости } H = f(Q) \text{ при } \omega = \text{const (см. рис. 10.3). На рис. 10.4a, б, в приведены характеристики вентиляторов при } n = \text{const и } n = \text{var. Штриховыми линиями на рис. 10.4б показаны линии постоянных КПД. Расчет характеристик при других скоростях производится по соотношениям [6, 52, 53]:}$$

ристиками, представляющими зависимости $H = f(Q)$ при $\omega = \text{const}$ (см. рис. 10.3). На рис. 10.4а, б, в приведены характеристики вентиляторов при $n = \text{const}$ и $n = \text{var}$. Штриховыми линиями на рис. 10.4б показаны линии постоянных КПД. Расчет характеристик при других скоростях производится по соотношениям [6, 52, 53]:

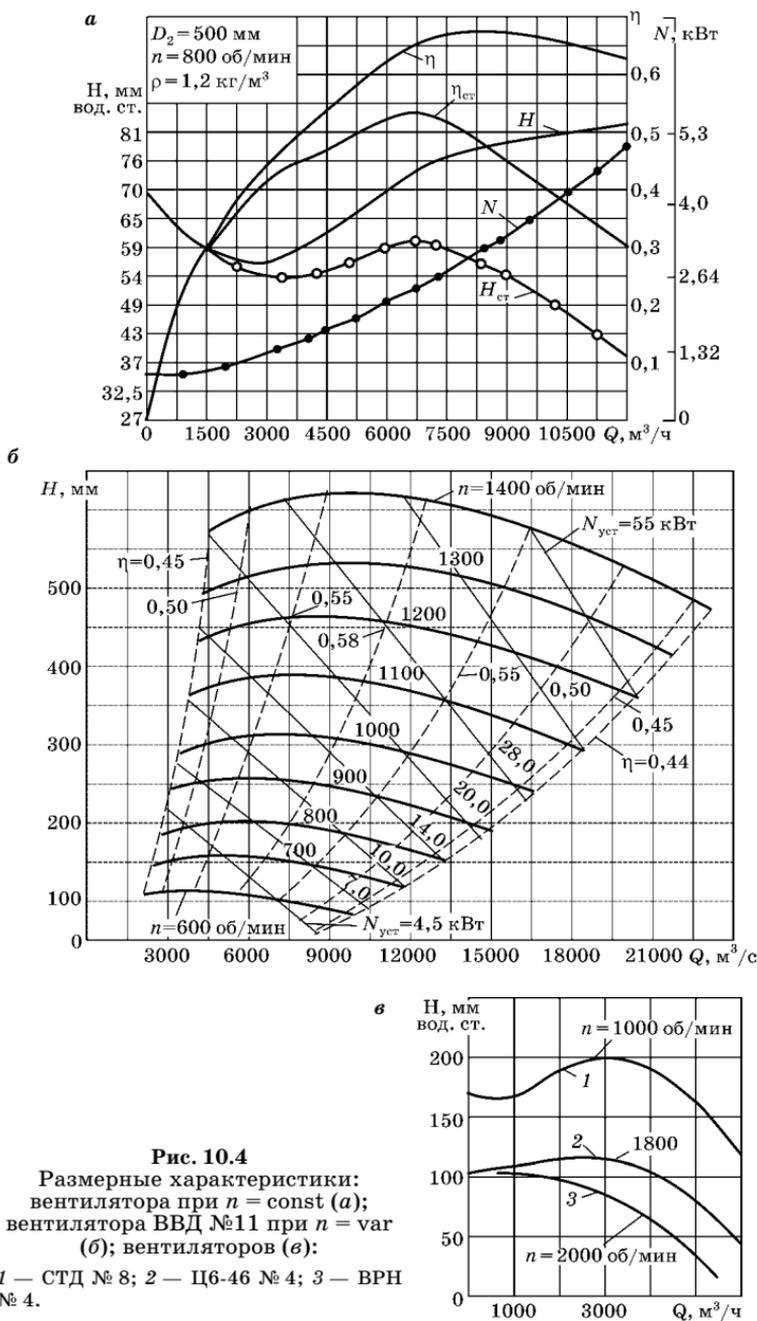
$$\begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_2} &= \frac{\omega_1}{\omega_2}; \\ Q &= K_Q \cdot \omega; \\ \frac{H_1}{H_2} &= \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^2; \\ H &= K_H \cdot \omega^2. \end{aligned} \quad (10.3)$$

Видно, что расход пропорционален первой степени скорости, а напор — второй. Следовательно, полезная мощность турбомеханизма пропорциональна кубу угловой скорости, а момент — квадрату.

$$\begin{aligned} P_{\text{нпол}} &= K_p \cdot \omega^3 \equiv \omega^3; \\ M &= \frac{P_{\text{нпол}}}{\omega} \equiv \omega^2 \equiv H^2. \end{aligned} \quad (10.4)$$

Подобные зависимости сохраняются и для механической мощности приводного двигателя по (10.2) при условии неизменности КПД.

Отметим, что (10.3, 10.4) справедливы при работе турбомеханизма на сеть с постоянными параметрами при отсутствии статической составляющей напора. В случае работы насоса в замкнутой системе со стабилизацией напора $H = \text{const}$ при $Q = \text{var}$ момент $M = \text{const}$, если $\omega = \text{var}$.



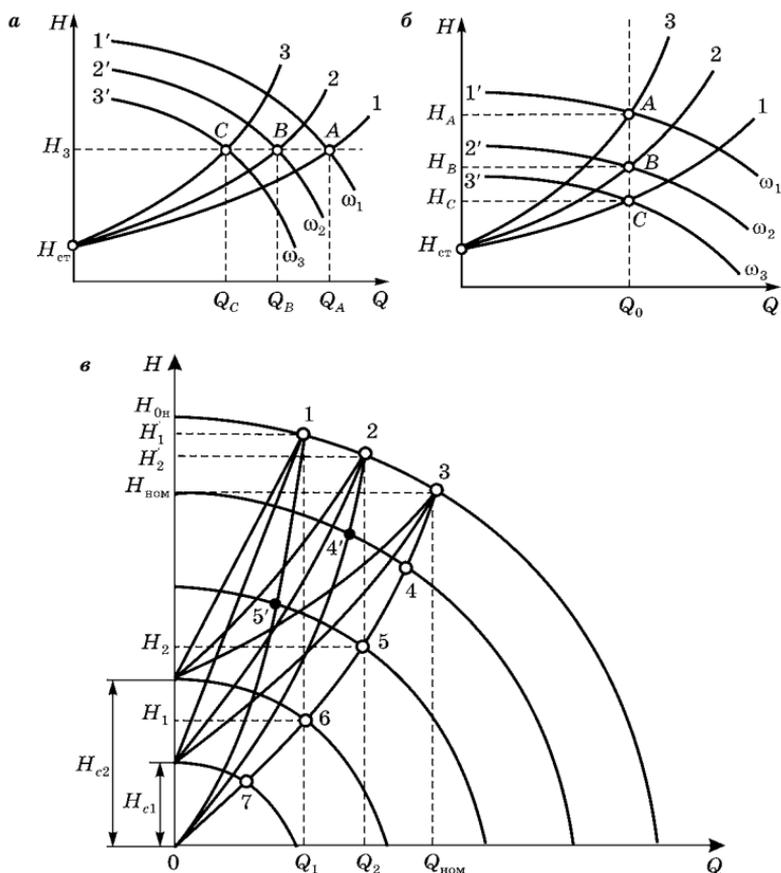


Рис. 10.5

Характеристики насосов при различных частотах вращения и сопротивлениях сети:

a — режим стабилизации напора при $Q = \text{var}$; *б* — режим стабилизации расхода при $H = \text{var}$; *в* — общий случай, $H = \text{var}$, $Q = \text{var}$.

Установившийся режим работы или рабочая точка определяется пересечением Q – H -характеристики турбомеханизма ($1'$, $2'$, $3'$) с характеристикой магистрали (1 , 2 , 3) (рис. 10.5), на которую работает насос. Характеристика сети описывается выражением [5, 11, 53]

$$H_c = H_{\text{ст}} + R \cdot Q^2, \quad (10.5)$$

где R — коэффициент сопротивления магистрали,

$$R = \frac{(H_{\text{ном}} - H_{\text{ст}})}{Q_{\text{ном}}^2}$$

показывает потерю давления (напора) в сети; $H_{\text{ст}}$ — статический напор, обусловленный разностью уровней конца и начала магистрали или противодавлением.

При работе вентилятора, например, когда воздух забирается снаружи, прогоняется через помещение и выбрасывается наружу,

$$H_c = R \cdot Q^2. \quad (10.6)$$

Для этого случая момент сопротивления турбомеханизма, приведенный к валу двигателя, будет

$$M = M_{\text{тр}} + K_m \cdot \omega^2. \quad (10.7)$$

Величина $K_m \cdot \omega^2$ — аэродинамическая (гидравлическая) составляющая сопротивления, а $M_{\text{тр}}$ — составляющая от сил трения в подшипниках, передаче. Практика показывает, что механическая характеристика турбомеханизма в относительных единицах с достаточной точностью может быть записана

$$\frac{M}{M_{\text{ном}}} = 0,05 + 0,95 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2. \quad (10.8)$$

Если насосы и вентиляторы работают с постоянной подачей, то в них используется, как правило, нерегулируемый асинхронный электропривод. Режим работы в большинстве случаев длительный (S1), нагрузка спокойная, перегрузочная способность двигателя $\frac{M_m}{M_n} \approx 2$. Прямой пуск осуществляется в режиме холостого хода, при закрытой задвижке ($Q = 0$).

В некоторых случаях для снижения динамических нагрузок используются устройства плавного пуска (УПП) на основе тиристорного регулятора напряжения (ТРН) (см. главу 4). Такой мягкий пуск чаще применяется в вентиляторных установках, обладающих значительными моментами инерции и малыми моментами трогания, а также в насосах во избежание гидравлических ударов.

В Приложении (табл. 22–26) приведены технические характеристики некоторых вентиляторных и насосных агрегатов.

10.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ ТУРБОМЕХАНИЗМА

Многие насосы и вентиляторы работают в системах, где требуется регулирование подачи жидкости (воздуха): холодное и горячее водоснабжение, собственно теплогенерирующие предприятия (котельные и ТЭЦ), очистные сооружения, поддержание микроклимата в помещениях ферм, хранилищ и т. д. Механизмы этих систем, выбранные по максимальной производительности, значительную часть времени (сезонно, по времени суток) работают с существенно меньшей подачей. По некоторым данным среднесуточная загрузка насосов холодного водоснабжения составляет 50–55% от максимальной [11, 12]. Из рис. 10.5 видно, что регулирование подачи можно изменять величиной сопротивления сети при $\omega = \text{const}$ или регулированием скорости вращения насоса без изменения параметров сети.

До недавнего времени регулирование подачи при $\omega = \text{const}$ осуществлялось дросселированием на стороне нагнетания, т. е. искусственным увеличением сопротивления сети (аналогия в электроприводе — регулирование скорости двигателя постоянного тока введением дополнительного сопротивления в цепь якоря). Такой способ регулирования в системах водоснабжения:

1) не обеспечивает заметного снижения потребляемой электродвигателем мощности (основной недостаток);

2) приводит к утечке воды (потери — до 20%) в силу значительного роста напора при снижении подачи (см. рис. 10.5), неблагоприятно сказывается на работе оборудования и сетей водоснабжения;

3) снижает ресурс работы оборудования.

Учитывая, что рост тарифов на электроэнергию носит опережающий характер по сравнению с другими затратами, проблема энергосбережения при работе электроприводов турбомеханизмов приобретает первостепенное значение. Таким образом, сказанное выше объективно подтверждает переход от систем дроссельного регулирования к системам автоматического поддержания напора при $Q = \text{var}$ за счет регулирования скорости вращения (см. рис. 10.5),

в частности применением частотно-регулируемых асинхронных электроприводов. При снижении расхода Q , но заданном напоре $H_3 = \text{const}$, насосный агрегат работает на искусственных характеристиках (точки B, C на рис. 10.5), при пониженных скоростях ω_2, ω_3 . Стабилизация расхода $Q_3 = \text{const}$ при различных сопротивлениях сети 1, 2, 3 также сопровождается работой на искусственных характеристиках 1', 2', 3' насоса (рис. 10.5б). В системах водоснабжения в ночное время потребление воды уменьшается за счет увеличения сопротивления сети (кривые 0-1, 0-2, 0-3 на рис. 10.5в). В этом случае при $\omega = \text{const}$ рабочая точка переходит из точки 3 в 2 или 1. Имеют место излишки напора $(H'_2 - H_{\text{ном}})$, $(H'_1 - H_{\text{ном}})$. При регулировании скорости двигателя (насоса) и неизменном сопротивлении сети рабочая точка перемещается 3-4-5-6-7, т. е. изменяются и расход Q и напор H . На практике в ночное время регулирование насосных агрегатов производят так, чтобы поддерживать напор $H \geq H_{\text{min}}$, а $H_{\text{min}} \cong (0,5 \div 0,7)H_{\text{н}}$. Следовательно, можно говорить о перемещении рабочей точки 3-4'-5'. В результате уменьшаются потери воды и экономится электроэнергия. При этом нет избытка напора в системе, уменьшаются потери воды, сохраняется ресурс оборудования.

Оценка энергопотребления при дроссельном и частотном регулировании подачи может быть выполнена по [10].

При частотном регулировании, осуществляемом при постоянстве абсолютного скольжения (стабилизация напора при $Q = \text{var}$), КПД двигателя [10, 11]

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{\text{н}} \cdot s_{\text{н}}}{\omega \cdot (1 - s_{\text{н}})} \cdot (1 + a)}, \quad (10.9)$$

где $\omega_{\text{н}}$, $s_{\text{н}}$ — номинальные угловая скорость и скольжение двигателя; $a = \frac{R_1}{R'_2}$.

При дроссельном регулировании $\omega \approx \omega_{\text{н}}$, КПД двигателя $\eta \approx \text{const}$ и определяется как [10]

$$\eta = \frac{1 - s_{\text{н}}}{a \cdot s_{\text{н}} + 1}, \quad (10.10)$$

но полезная мощность насоса снижается.

Потребляемая насосным агрегатом электрическая мощность в относительных единицах рассчитывается по соотношениям [11]

$$P_1^* = \frac{P_1}{P_6} = \frac{P_1}{M_{c \max} \cdot \omega_H}.$$

При дроссельном регулировании

$$P_1^* = \frac{[\mu_{oc} + (1 - \mu_{oc}) \cdot Q^*] \cdot (1 + a \cdot s_H)}{1 - s_H}. \quad (10.11)$$

При частотном управлении

$$P_1^* = [\mu_{oc} \cdot A^3 + (1 - \mu_{oc}) \cdot A^2 \cdot Q^*] \cdot \left[1 + \frac{s_H \cdot (1 + a)}{(1 - s_H) \cdot A} \right], \quad (10.12)$$

где μ_{oc} — статический момент на валу (M_{oc}^*) при $Q = 0$ (закрытая задвижка, холостой ход насосов) в относительных

единицах, $\mu_{oc} = \frac{M_{oc}}{M_{c \max}}$; $M_{c \max}$ — максимальный момент на

валу механизма, при $\omega = \omega_H$; $Q^* = \frac{Q}{Q_H}$; $A = \sqrt{h_c + Q^{*2} \cdot (1 - h_c)}$;

$h_c = \frac{H_{ct}}{H_{0H}}$; H_{0H} — напор насоса при $Q = 0$ и $\omega = \omega_H$; при работе на сеть без противодействия (вентиляторы) $h_c = 0$ и $A = Q^*$; H_{ct} — статический напор (противодавление) при $Q = 0$.

Задавая параметры μ_{oc} , h_c , a , s_H , рассчитывают значения $P_1^* = f(Q^*)$. В табл. 10.1 приведены значения потребляемой мощности $P_1^* = f(Q^*)$ при $\mu_{oc} = 0,4$, $a = 1$ ($R_1 = R_2'$), $s_H = 0,04$. Подобная зависимость (при $h_c = 0$) представлена на рис. 2.14в.

По имеющимся результатам расчета мощности рассчитывается зависимость (экономия) мощности, или при заданном графике $Q(t)$ можно перейти к расчету экономии электроэнергии за некоторый интервал времени (сутки, месяц и т. д.).

Из табл. 10.1 следует, что с увеличением статического напора h_c экономия электроэнергии снижается, что объясняется физически (h_c полезной работы не производит). Выражения (10.11), (10.12) получены в предположении,

Таблица 10.1

**Мощность, потребляемая электроприводом насоса
при дроссельном и частотном регулировании**

Расход Q^*	P_1^*					
	Дроссельное регулирование	Частотное регулирование				
		$h_c = 0$	$h_c = 0,2$	$h_c = 0,4$	$h_c = 0,6$	$h_c = 0,8$
0	0,43	0	0,04	0,11	0,20	0,31
0,2	0,56	0,01	0,08	0,18	0,30	0,42
0,4	0,69	0,08	0,16	0,28	0,41	0,55
0,6	0,82	0,24	0,35	0,45	0,58	0,70
0,8	0,95	0,56	0,64	0,71	0,80	0,87
1,0	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08

что КПД насосов $\eta_{\text{нас}} = 1$ и остается неизменным вне зависимости от Q , H . Реально КПД зависит от расхода и других параметров (см. рис. 10.3). Это следует учитывать для получения более достоверных результатов.

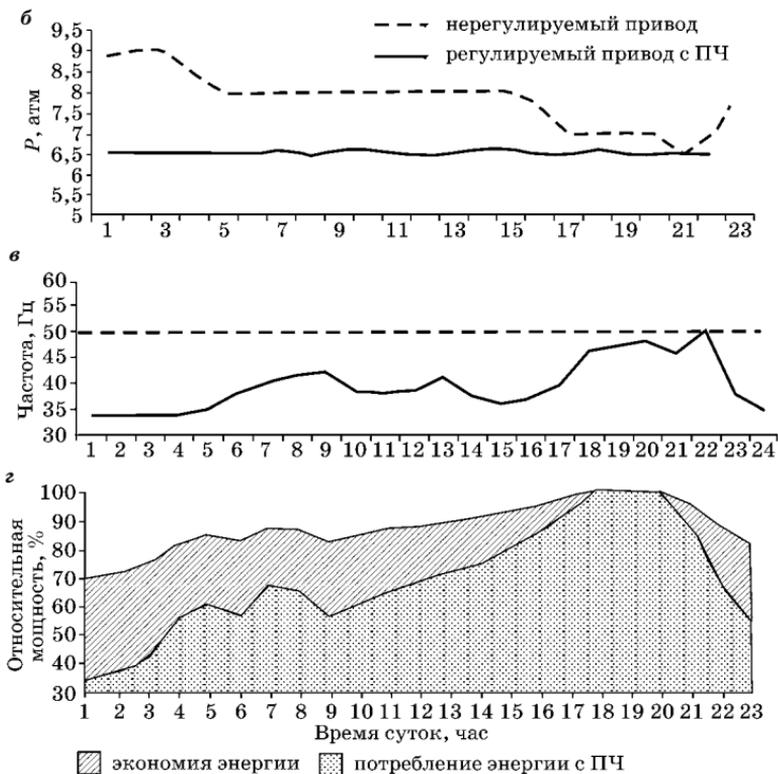
На рис. 10.6 приведены зависимости, характеризующие работу насосного агрегата системы водоснабжения по схеме рис. 10.6а с мощностью двигателя 15 кВт. Результаты были получены фирмой Hitachi в 2001 г. В настоящее время насосные станции в системах холодного и горячего водоснабжения, подпиточные насосы теплогенерирующих предприятий оборудуются частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами. Очевидно, что чем больше неравномерность расхода Q , тем экономичнее использование такого привода.

Вентиляторы всегда работают на сеть без противодействия, поэтому $M \equiv \omega^2$, $P = M \cdot \omega \equiv \omega^3$. Характеристики центробежных вентиляторов аналогичны характеристикам центробежных насосов.

Способы регулирования подачи: поворотом лопастей направляющего аппарата (аэродинамический); шибером, аналогично дроссельному регулированию насосов; изменением скорости вращения, при этом $H_c = 0$, $H = R \cdot Q^2$, а КПД остается постоянным [5]. Регулирование поворотом лопастей неэкономично, сложно, хотя и используется на практике.



Рис. 10.6
Схема насосного агрегата при стабилизации давления и переменном расходе (*а*); характеристики работы агрегата (*б*, *в*, *г*)



Потребляемая двигателем вентилятора мощность рассчитывается по (10.11), (10.12) при $h_c = 0$, $\mu_{oc} = 0$. При регулировании шибером [10]

$$P_1^* = \frac{(1 + a \cdot s_{\text{н}})}{1 - s_{\text{н}}} \cdot Q^*, \quad (10.13)$$

при частотном регулировании [10]

$$P_1^* = Q^{*3} + \frac{s_H \cdot (1+a)}{1-s_H} \cdot Q^{*2}. \quad (10.14)$$

Зависимости $P_1^* = f(Q^*)$ по (10.13), (10.14) приведены на рис. 10.7а. Пунктирными линиями изображены графики мощности с учетом КПД вентилятора. На рис. 10.7б, в представлены опытные данные [10] по эксплуатации приводов вентиляторов при регулировании направляющим аппаратом и частотном регулировании. Приведенные результаты наглядно показывают эффективность использования регулируемых электроприводов.

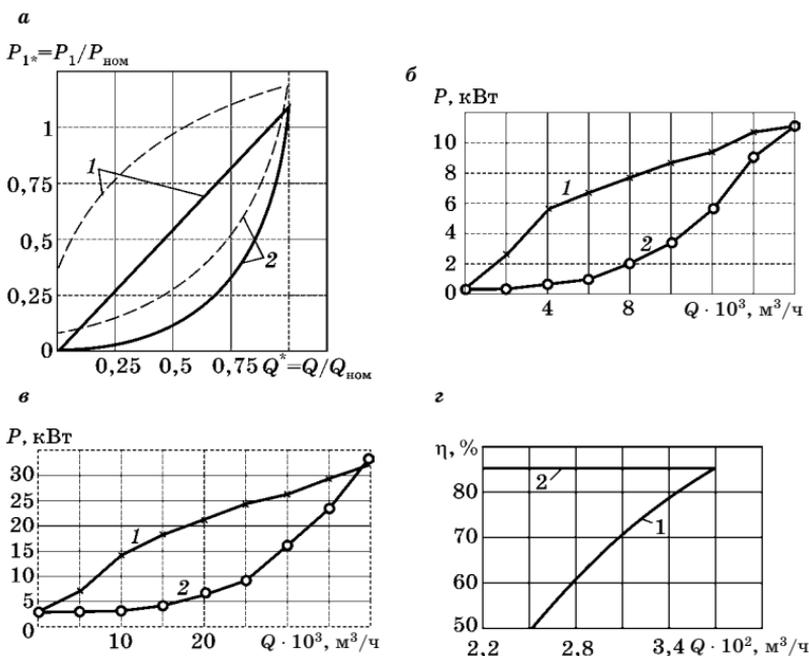


Рис. 10.7
Зависимости изменения мощности, потребляемой из сети электроприводом вентилятора:

а — при регулировании шибером (1) и частотном регулировании (2); б — двигателем вентилятора при регулировании направляющим аппаратом (1) и при частотном регулировании (2); в — двигателем дымососа при регулировании направляющим аппаратом (1) и при частотном регулировании (2); г — изменение КПД вентилятора при регулировании его подачи направляющим аппаратом (1) и изменением частоты вращения (2); - - - с учетом КПД вентилятора.

Вентиляторы обладают большим моментом инерции, что нужно учитывать при выборе оборудования для обеспечения пуска. Необходимый диапазон регулирования скорости вентиляторов обычно не превышает 2:1, поэтому наиболее рациональными типами электроприводов являются частотно-регулируемый или на основе асинхронного двигателя с переключением числа пар полюсов.

10.3. ВЫБОР МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВодОВ НАСОСОВ И ВЕНТИЛЯТОРОВ

Рассмотрим только два типа асинхронного привода: нерегулируемый и регулируемый по системе ПЧ-АД.

Нерегулируемый электропривод может эффективно работать в системе водоснабжения при неизменных (практически) расходе Q и напоре H . В качестве примера может служить показанная на рис. 10.8 схема башенного водоснабжения, когда насосный агрегат включается автоматически для заполнения бака (напорного сооружения). В этом случае, в зависимости от режима работы (S1 или S2), который определяется расходом воды из бака и его емкостью, мощность электродвигателя рассчитыва-

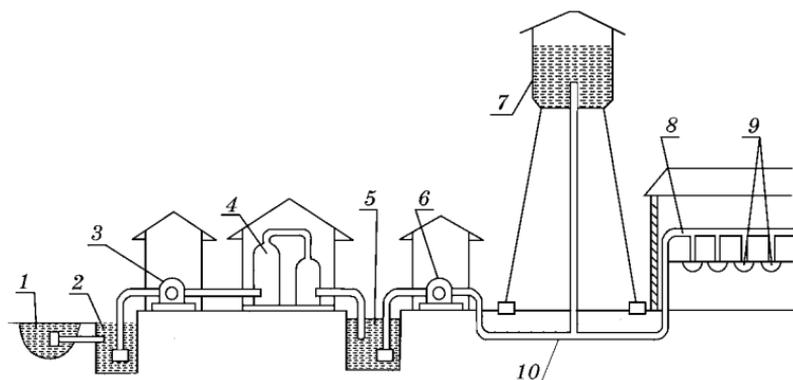


Рис. 10.8
Схема башенного водоснабжения:

1 — источник воды; 2 — водозаборное сооружение; 3 — насосная станция первого подъема воды; 4 — очистное сооружение; 5 — резервуар чистой воды; 6 — насосная станция второго подъема; 7 — напорное сооружение; 8 — внутренний водопровод; 9 — водораздаточное устройство; 10 — внешний водопровод.

ется по методике, изложенной в главе 7. Основная особенность такого привода — возможность прямого пуска, следовательно, питающая сеть должна обладать достаточной мощностью, т. е. необходима проверка по допустимой величине потери напряжения при пусковых токах. Для снижения динамических нагрузок может быть использовано устройство плавного пуска (УПП) (см. главу 4).

В случае переменной подачи (дрессельное регулирование) мощность двигателя для режима S1

$$P_H \geq K_3 \cdot \frac{Q_m \cdot H_H \cdot \rho \cdot g}{\eta_H}, \quad (10.15)$$

где Q_m , H_H — максимальный расход и номинальный напор соответственно; K_3 — коэффициент запаса, $K_3 \approx 1,1 \div 1,2$; η_H — КПД насоса.

Для частотно-регулируемого электропривода при $H = \text{const}$ необходимо знать график изменения подачи Q от времени в определенном интервале (сутки, месяц). Очевидно, что ориентироваться следует на режим работы при максимальном расходе. При этом аналогично (10.15)

$$P_H = \frac{Q_m \cdot H_H \cdot \rho \cdot g}{\eta_H}. \quad (10.16)$$

Следует отметить, что возможно некоторое отклонение от (10.16) в меньшую сторону по P_H , если интервалы работы с Q_m коротки ($t_p < T_H$). При меньших $Q < Q_m$ агрегат будет работать с недогрузкой, что обеспечит сохранение ресурса оборудования, экономию электроэнергии и воды.

На рис. 10.9а приведена упрощенная однолинейная схема электрооборудования насосной станции при возможном питании от двух фидеров [10, 11]. Двигатели М1 и М3 питаются от преобразователя частоты (ПЧ), с помощью которого производятся пуск и регулирование расхода при $H = \text{const}$. Двигатели М2 и М4 включены через устройство плавного пуска. Сначала запускается двигатель М1 или М3 от ПЧ. Если агрегат выходит на номинальный режим (ω_H , Q_H , H_H), то запускается двигатель М2 или М4 от устройства плавного пуска. Под действием регулятора

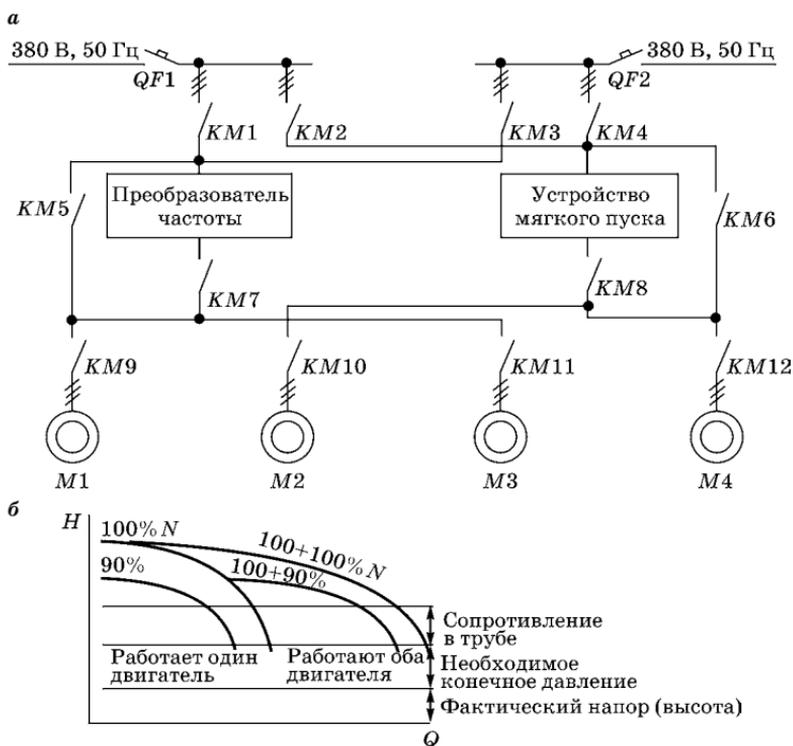


Рис. 10.9

Упрощенная однолинейная схема электрооборудования насосной станции (а); $H-Q$ – характеристики при параллельной работе двух насосов (б)

напора снижается частота вращения М1 или М3, поддерживая $H = \text{const}$. После пуска двигатели М2 или М4 подключаются непосредственно к сети. Таким образом, постоянно в работе находятся два насоса: один при ω_n (М2 или М4), другой в режиме регулирования скорости $\omega = \text{var}$. При минимальном расходе (ночное время) в работе может оставаться один двигатель, питаемый от ПЧ. Подобные схемы используются для подпиточных насосов в системах горячего водоснабжения.

На рис. 10.9б приведены $Q-H$ -характеристики двух параллельно работающих насосов: регулируемого и нерегулируемого — по схеме поддержания необходимого конечного давления (напора).

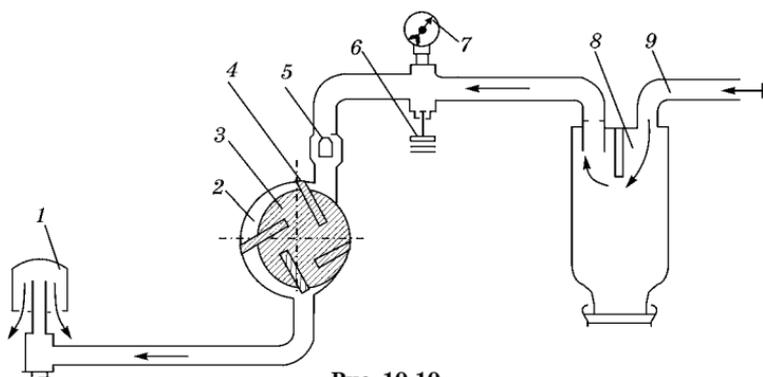


Рис. 10.10
Схема вакуумной установки:

1 — глушитель; 2 — корпус насоса; 3 — ротор насоса; 4 — пластина; 5 — колпачок предохранителя; 6 — вакуум-регулятор; 7 — вакуумметр; 8 — вакуум-балон; 9 — вакуум-провод.

Для вакуумной установки (доильные машины) (рис. 10.10) используются ротационные насосы (см. рис. 10.2). При вакууме ~ 50 кПа подача насосов в зависимости от количества доильных стаканов составляет $40 \div 400$ м³/ч при мощности двигателя $P_{эд} = 3 \div 14$ кВт. Для машины АДМ-8, например, $Q = 60$ м³/ч, $P_{эд} = 4$ кВт.

Мощность двигателя вакуум-насоса

$$P_{эд} = \frac{\omega \cdot M_m}{\eta_n}, \quad (10.17)$$

где ω — угловая скорость вращения ротационного насоса; M_m — максимальный момент сопротивления, Н·м; η_n — КПД вакуумной установки, $\eta_n = 0,75-0,85$.

Момент M_m определяется, как [47, 49]

$$M_m = h_p \cdot e \cdot D \cdot L, \quad (10.18)$$

где h_p — расчетное разрежение в системе, $h_p \approx 66 \cdot 10^3$ Па;

e — эксцентриситет насоса, $e = \frac{D-d}{2}$; D — диаметр цилиндра, м; d — диаметр ротора, м; L — длина ротора, м.

Для насоса машины АДМ-8: $e = 0,008$ м, $D = 0,146$ м, $d = 0,130$ м, $L = 0,2$ м, число лопаток $z = 4$.

Современные доильные установки в большинстве своем оборудуются автоматизированным частотно-управляемым электроприводом вакуум-насосов.

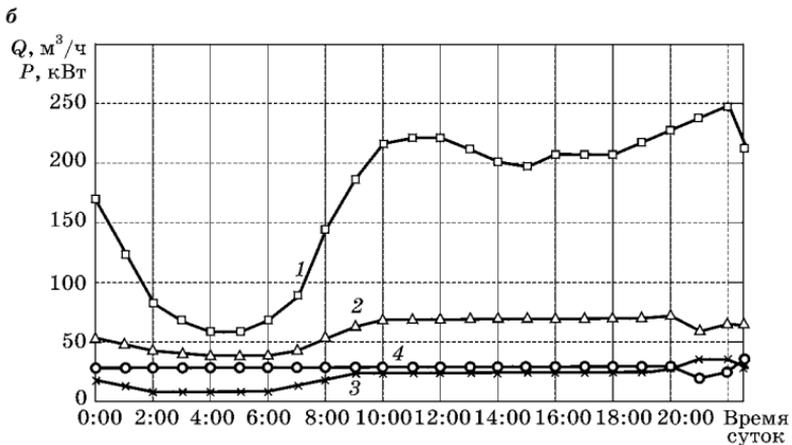
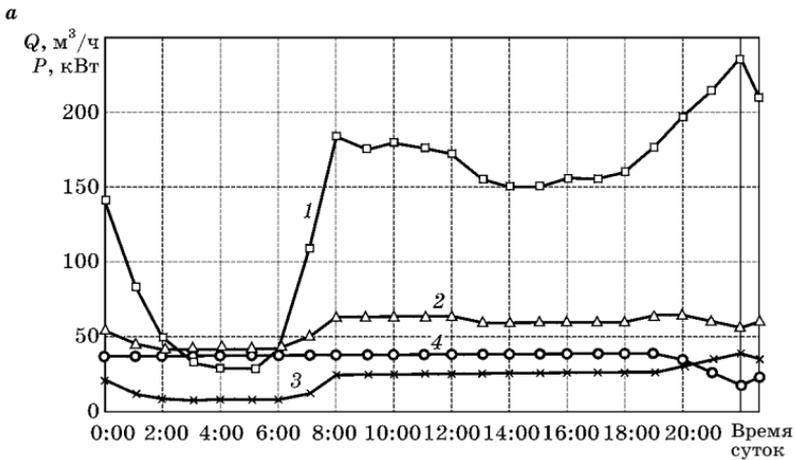


Рис. 10.11

Усредненные характеристики работы подпиточных насосов котельной в будни (*a*) и выходные (*б*) дни:

1 — расход воды, в $\text{м}^3/\text{ч}$; 2 — активная мощность с нерегулируемым электроприводом, кВт; 3 — активная мощность с ППЧ, кВт; 4 — экономия мощности, кВт.

В качестве подтверждения эффективности регулирования привода насосов на рис. 10.11 приведены графики расхода воды в системе горячего водоснабжения и потребляемой мощности. Видно, что экономия мощности (и электроэнергии) составляет до 50% по сравнению с нерегулируемым приводом. Для вентиляторов действительны соотношения (10.15, 10.16).

10.4. СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПОРА В СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Для большой группы насосных установок экономичный режим энергопотребления обеспечивается при стабилизации напора в системе подачи жидкости. К таким установкам относятся насосные станции II и III подъемов водопроводов, подкачивающие (повысительные) станции, закрытые системы орошения. Необходимость стабилизации напора обусловлена переменным водопотреблением (краны у потребителей закрываются/открываются), которое носит вероятностный характер (см. рис. 10.6). Следовательно, требуется поддержание насосной установкой необходимых напора и подачи, обеспечивающих при этом минимально возможное энергопотребление [5]. Эта задача решается системой автоматического регулирования (САР) установки, стабилизирующей напор по заданному значению. Практически стабилизировать напор во всех источниках сложной разветвленной сети невозможно, поэтому можно говорить лишь о некоторых отдельных точках, называемых *диктующими*. В этом качестве выбирают, как правило, точки, наиболее удаленные в гидравлическом отношении, расположенные на более высоких отметках. В остальной системе поддерживается такое же или несколько большее давление. Место расположения диктующих точек определяется гидравлическим расчетом сети или опытным путем на основании эксплуатационных наблюдений. Иногда, при близком положении станции и потребителей, диктующая точка располагается на напорном коллекторе (подкачивающие станции).

На рис. 10.12 приведена принципиальная схема стабилизации напора в диктующей точке A , в которой должен поддерживаться свободный напор $H_{\text{св}}$. Вследствие разности отметок z_2 и z_1 и сопротивления водоводов насос должен развить напор

$$H = (z_2 - z_1) + H_{\text{св}} + RQ^2, \quad (10.19)$$

где $z_2 - z_1$ — статический напор H_c ; R — гидравлическое сопротивление сети; RQ^2 — динамическая составляющая напора. САР (рис. 10.12) состоит из насосного агрегата

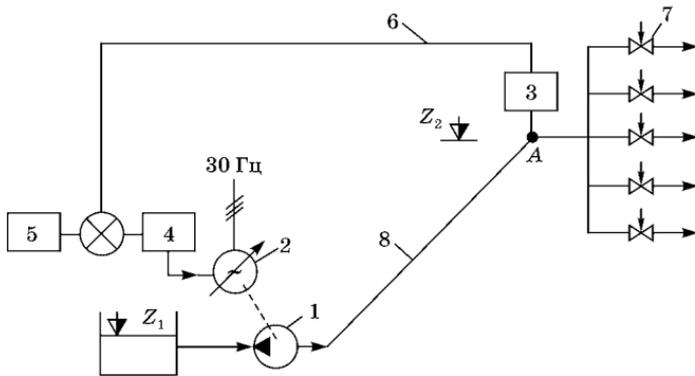


Рис. 10.12
Схема стабилизации напора в диктующей точке А водопроводной сети:

1 — центробежный насос; 2 — регулируемый электропривод; 3 — датчик давления; 4 — ПИ-регулятор; 5 — задающее устройство; 6 — канал связи; 7 — водо-разборные устройства; 8 — водопровод.

с регулируемым электроприводом, датчика (преобразователя) давления, ПИ-регулятора, задающего устройства (задатчика давления) и каналов связи. Если напор в точке А оказывается выше заданного, от ПИ-регулятора в привод (например, ПЧ для асинхронного привода) поступает команда на снижение частоты вращения, и наоборот. Регулирование напряжения и частоты близко к условию $M \equiv H_2 = \text{const}$, т. е. $U/f = \text{const}$.

Процесс регулирования иллюстрирует рис. 10.13. Пусть в момент времени t_1 насос работает с частотой вращения n_1 , подачей Q_1 и напором H_1 . При этом потери напора $H_{\text{дин}1}$, а в диктующей точке А $H_{A1} = H_1 - H_{\text{дин}1}$. Предположим, что $H_{A1} = H_{\text{зад}}$. В момент t_2 закрывается кран, отбор воды уменьшается до Q_2 , а напор при $n = n_1$ стал $H_2 > H_1$, $H_{\text{дин}2} < H_{\text{дин}1}$. Напорная характеристика займет положение, соответствующее частоте вращения n_2 (рис. 10.13). В итоге рабочая точка займет положение 2. Такие же действия системы будут и при снижении расхода до Q_3 : теперь рабочая точка переместится в 3'. В этом случае рабочая точка насоса в процессе регулирования перемещается плавно по характеристике трубопровода, и система работает без превышения напора.

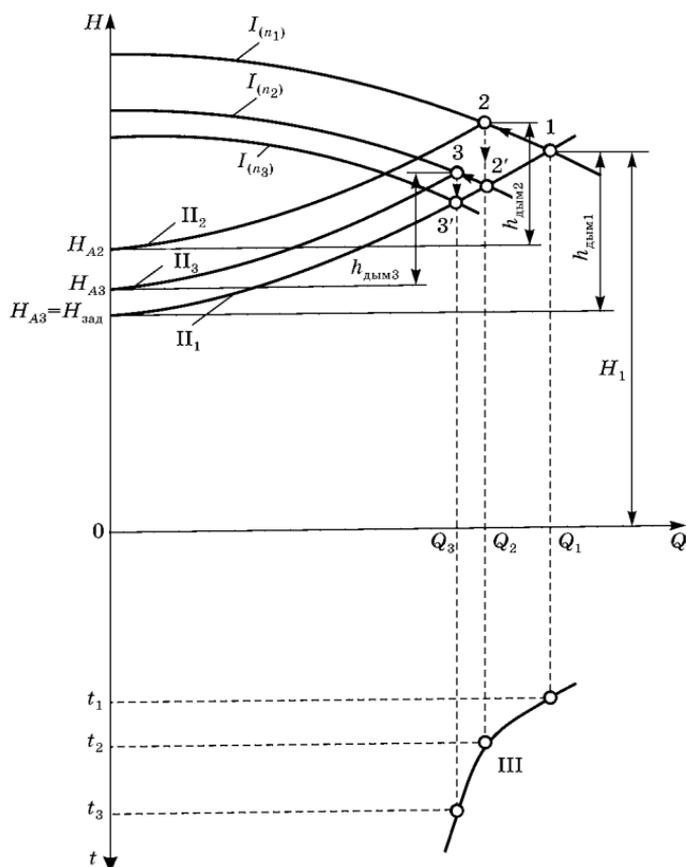


Рис. 10.13

Процесс стабилизации напора в диктующей точке А:

$I_{(n_1)}$, $I_{(n_2)}$, $I_{(n_3)}$ — характеристики регулируемого насоса при n_1 , n_2 , n_3 , соответственно; II_1 , II_2 , II_3 — характеристики водовода в разные моменты времени t_1 , t_2 , t_3 , соответственно; III — график водопотребления.

На рис. 10.14 представлены почасовые графики потребления в течение суток по ВНС «Орловская» Пушкинского водоканала для насосного агрегата № 1 мощностью $P_{2Н} = 250$ кВт, работающего на два водовода (2 кривые). Привод — асинхронный частотно-регулируемый, управление — по величине напора в начале напорного патрубка. В табл. 10.2 приведены соответствующие рис. 10.14 значения потребляемой мощности. Насос № 2: тип К90/85,

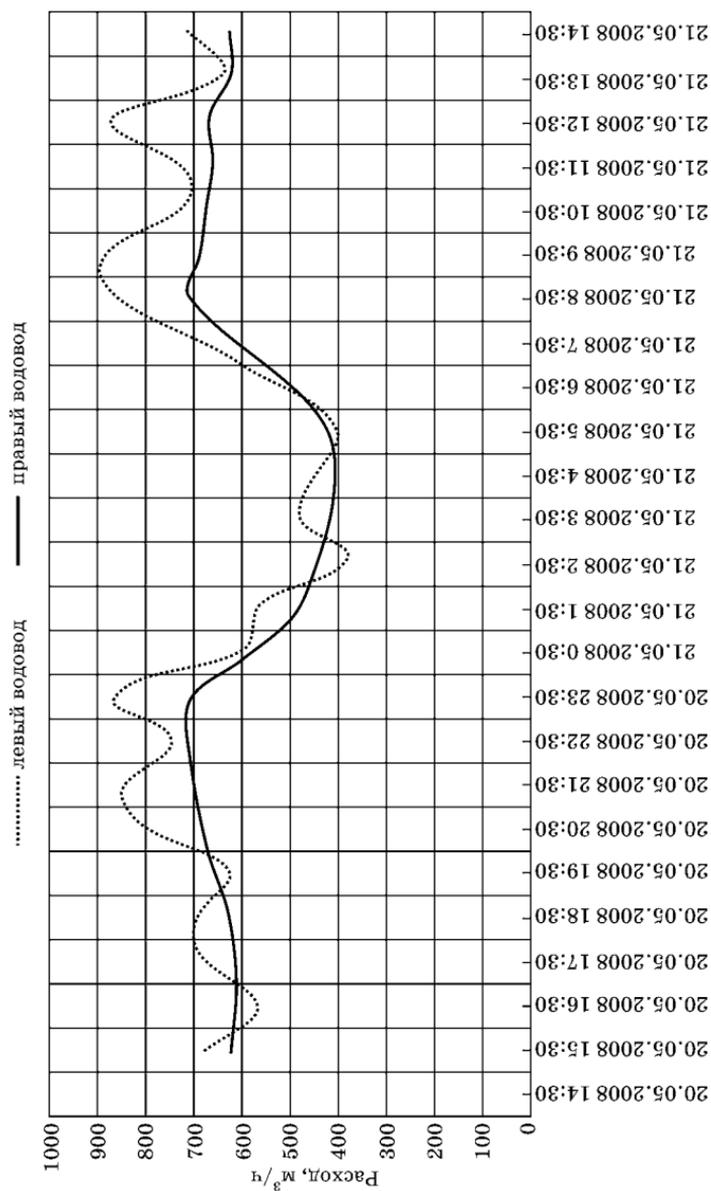


Рис. 10.14

График часовой подачи по водоводам ВНС «Орловская» ПЭУ «Пушкин» за период измерения с (14:30) 20.05.2008 г. по (14:30) 21.05.2008 г.

номинальные напор $H = 85$ м, расход $Q = 90$ м³/ч, мощность $P_n = 45$ кВт, скорость вращения $n_n = 2900$ об/мин.

Видна резкая неравномерность потребления воды и электрической мощности. Если бы насосный агрегат работал при $n = \text{const}$, то потребляемая мощность мало зависела бы от расхода Q и соответствовала значению около 200 кВт. Оценочные расчеты показали, что экономия по мощности составляет до 30%. Кроме того, система при регулировании работает без излишков давления, снижаются потери воды, сохраняется ресурс оборудования.

Таблица 10.2

Зависимость мощности, потребляемой насосными агрегатами, от времени суток, 12.04.2009 г.

Время суток	Агрегат № 1, P_1 , кВт	Агрегат № 2, P_2 , кВт	Итого, $P_1 + P_2$, кВт
1:00	133,23	37,2	170,43
2:00	125,28	37,92	163,2
3:00	120,51	36,6	157,11
4:00	116,13	36,48	152,61
5:00	116,28	36,84	153,12
6:00	115,71	34,68	150,39
7:00	134,49	22,56	157,05
8:00	153,87	11,76	165,63
9:00	171,21	11,16	182,37
10:00	192,54	13,32	205,86
11:00	204,12	13,92	218,04
12:00	199,11	14,52	213,63
13:00	192,51	18,36	210,87
14:00	189,93	16,08	206,01
15:00	185,34	14,40	199,74
16:00	187,50	15,0	202,5
17:00	186,09	16,32	202,41
18:00	180,18	16,32	196,50
19:00	184,05	16,20	200,25
20:00	191,70	18,36	210,06
21:00	202,17	19,20	221,37
22:00	215,67	31,8	247,47
23:00	223,35	42,96	266,31
24:00	177,06	43,56	220,62

11 ЭЛЕКТРОПРИВОД ТРАНСПОРТЕРОВ

11.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТЕРОВ ПО НАЗНАЧЕНИЮ И ПРИВОДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Транспортеры или подъемно-транспортные машины непрерывного действия используются для перемещения сельскохозяйственных грузов между кормоприготовительными агрегатами в кормоцехах и на комбикормовых заводах, для раздачи кормов, обслуживания машин на пунктах первичной обработки зерна, перемещения сыпучих строительных материалов и во многих других технологических процессах, организованных по схеме поточной линии. Непрерывность действия транспортеров обеспечивает их высокую производительность, определяет достаточную простоту и надежность электропривода. На рис. 11.1 показаны кинематические схемы наиболее распространенных типов транспортеров. Тяговыми элементами транспортеров служат текстильные прорезиненные ленты специального изготовления, цепи различных конструкций, тросы. Для механизмов с гибким тяговым органом характерно наличие следующих основных узлов:

- опорных роликов, по которым перемещается лента; настила (желоба), по которому движутся скребки; монорельса для движения кареток и др.;
- приводной станции, формирующей тяговое усилие и движение тягового органа;
- натяжной станции, обеспечивающей необходимое натяжение тягового органа.

В состав приводной станции входит электродвигатель с системой управления, передаточный механизм и приводной элемент (барaban, звездочка, блок и др.). При-

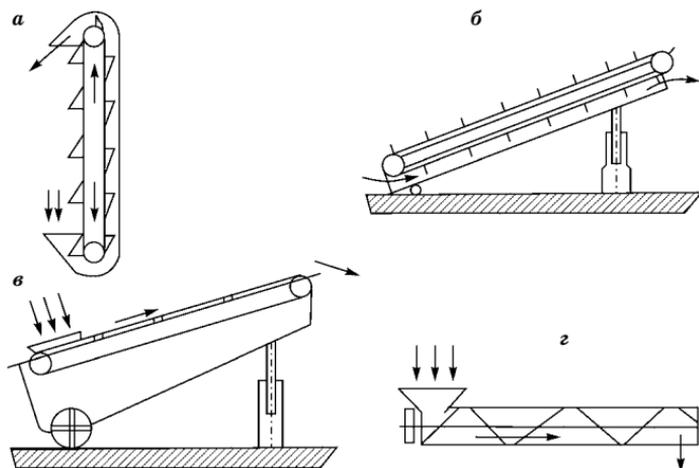


Рис. 11.1

Кинематические схемы стационарных транспортеров:

a — ковшового (нория); *б* — скребкового; *в* — ленточного; *г* — шнекового.

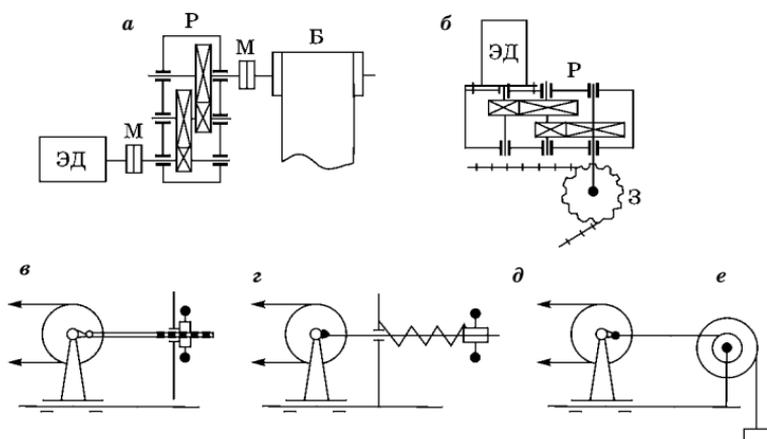


Рис. 11.2

Приводные (*a*, *б*) и натяжные (*в*, *г*, *д*) станции транспортеров:

a — фрикционные; *б* — с зацеплением; *в* — винтовые; *г* — пружинные; *д* — гру-
зовые.

водные элементы могут быть фрикционными и с зацеплением (рис. 11.2*a*, *б*). Выбор места расположения приводной станции определяется стремлением максимально уменьшить усилие на тяговом органе, а также удобством эксплуатации.

Натяжные станции могут быть прерывного (винтовые, рис. 11.2в) и непрерывного (пружинные, грузовые, рис. 11.2г, д) действия. В транспортерах большой длины натяжная станция обычно устанавливается в начале грузовой ветви, а приводная — в конце.

Режимы работы таких механизмов могут быть различными — S1, S2, S3, в зависимости от назначения. Особое место в работе привода занимает пусковой режим. При этом на длительность пуска, пусковые токи и потери, динамические нагрузки влияют способы пуска электродвигателя, момент сопротивления на валу, загрузка транспортера, зазоры в механических передачах, длина и степень обтянутости тягового органа (ленты, цепи). На рис. 11.3 приведены механические характеристики горизонтального транспортера (рис. 11.3а) при загрузке и на холостом ходу и нагрузочные диаграммы (рис. 11.3б–г). График на рис. 11.3б характерен для навозоуборочных транспортеров. По мере движения транспортер разгружается, время разгрузки

$$t_{\text{раз}} = \frac{l}{v}, \quad (11.1)$$

где l — длина транспортера, м; v — скорость движения тягового органа, м/с.

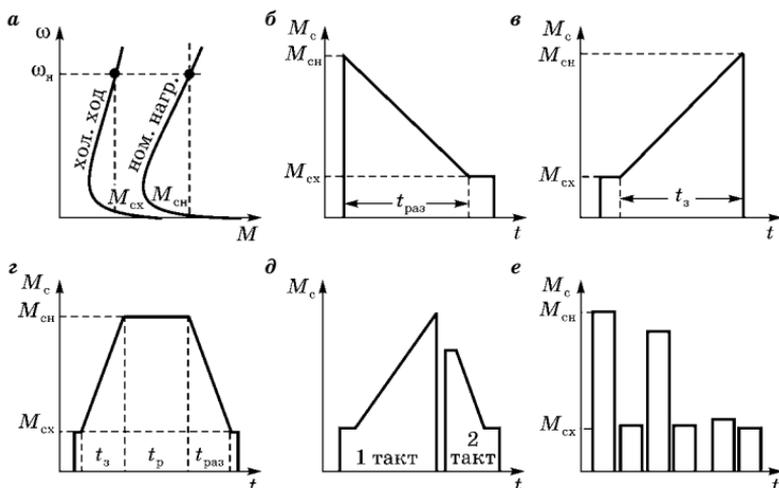


Рис. 11.3

Приводные характеристики транспортеров:

а — механические; б–е — нагрузочные.

Диаграмма по рис. 11.3в характерна для кормораздаточных механизмов, когда загрузка производится в одном месте и груз распределяется при движении по всей длине, время загрузки — по (11.1).

Диаграмма на рис. 11.3г включает участки загрузки, выгрузки и движения с установившимся моментом (t_p). По такой схеме работают транспортеры по перемещению грузов из одной точки в другую.

Диаграмма (рис. 11.3д) характерна для кормораздаточного транспортера с замкнутым цепочно-скребковым контуром. На рис. 11.3е — диаграмма навозоуборочного скребкового транспортера, работающего по циклу (рис. 11.3д).

В сельскохозяйственном производстве применяются в основном транспортеры с низкими скоростями перемещения, механические передачи имеют высокие передаточные отношения. Поэтому приведенный момент инерции зачастую невелик, и эта составляющая слабо сказывается на режиме пуска.

Расчет мощности электродвигателя приводов транспортеров начинается с определения статических нагрузок, т. е. сопротивления движению, строится нагрузочная диаграмма. Затем определяется мощность двигателя одним из способов, описанных в главе 7. Выбранный по условиям нагрева электродвигатель проверяется по условиям пуска и перегрузочной способности.

11.2. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Для каждого типа транспортера статические нагрузки рассчитываются по конструктивным параметрам и кинематической схеме.

Нории (ковшовые элеваторы, рис. 11.1а) предназначены для подъема сыпучих материалов в вертикальном направлении (или при некотором отклонении от вертикали). В качестве тягового органа используются цепи и ленты с ковшами, ведущие и ведомые звездочки (барабаны). Ведущая звездочка (барабан) приводится в действие электродвигателем через редуктор.

Производительность нории, кг/с и мощность электродвигателя, Вт в длительном режиме

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{\varphi \cdot v}{l} \cdot v \cdot \gamma \\ P &= \frac{g \cdot Q \cdot H}{\eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{п}}} \end{aligned} \right\} \quad (11.2, 11.3)$$

где φ — коэффициент заполнения ковшей, $\varphi = 0,75 \div 0,9$ для зерна, продуктов помола $\approx 0,33$; v — вместимость одного ковша, м³; l — расстояние между ковшами; v — скорость движения, для зерна $v = 2 \div 4$ м/с, для муки — $1 \div 1,5$ м/с, для корнеклубнеплодов — $0,3 \div 0,5$ м/с; γ — насыпная плотность транспортируемого материала, кг/м³; H — высота подъема, м; $g = 9,81$ м/с²; $\eta_{\text{н}}$ — КПД нории (для вертикального перемещения $0,5 \div 0,7$; для наклонного — $0,3 \div 0,4$ [46]); $\eta_{\text{п}}$ — КПД передачи от двигателя к нории.

Момент трогания нории без нагрузки составляет около 10% номинального момента сопротивления, момент трогания под нагрузкой может быть до $1,4M_{\text{н}}$. Поэтому прямой пуск осуществляется при незаполненных ковшах.

Механические характеристики нории представлены на рис. 11.4. Энергия приводной станции расходуется на преодоление сопротивления от перемещения груза и тягового органа. Сопротивление перемещения обусловлено силами трения во всех движущихся элементах, а также составляющими сил тяжести груза на наклонных участках.

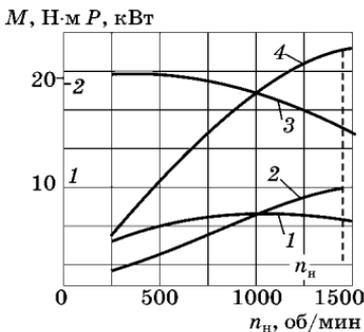


Рис. 11.4
Механические характеристики зерновой нории НЗ-20:
1 — момент холостого хода; 2 — мощность холостого хода; 3 — нагрузочный момент; 4 — мощность при нагрузке.

Силы сопротивления движению, определяющие мощность электродвигателя в установившемся режиме, зависят от натяжения тягового органа, коэффициентов трения и загрузки.

Скребковые транспортеры (см. рис. 11.1б) используются для перемещения зерна, корнеклубнеплодов, силосной массы, кормов, навоза. Груз по желобу перемещают скребки, укрепленные на одной или двух кольцевых цепях, движущихся со скоростью 0,3÷2,5 м/с. Производительность (кг/с) скребкового транспортера

$$Q = K_{\alpha} \cdot \varphi \cdot \gamma \cdot B \cdot H \cdot v, \quad (11.4)$$

где K_{α} — коэффициент, учитывающий степень заполнения скребков в зависимости от угла α наклона транспортера к горизонту; для легкосыпучих грузов $K_{\alpha} = 1 - 0,0175\alpha$, для плохо сыпучих $K_{\alpha} = 1,05 - 0,01\alpha$, α — град.; φ — коэффициент заполнения, $\varphi = 0,6 \div 0,8$; γ — насыпная плотность груза (кг/м³) (корнеклубнеплоды 450 кг/м³, зерно (450÷750) кг/м³, силос 270 кг/м³, навоз 1000 кг/м³); B — ширина скребков, м; H — высота скребков, м; v — скорость движения, от 0,50 до 0,25 м/с, в зависимости от перемещаемого материала.

Необходимая мощность электродвигателя для привода транспортера, Вт

$$P_{\text{эд}} = \frac{9,81 \cdot Q \cdot (H + f_c \cdot L \cdot \cos \alpha)}{\eta_{\text{п}}}, \quad (11.5)$$

где H — высота подъема; f_c — коэффициент сопротивления движению, $f_c = 1,1 \div 4$ (см. табл. 11.1) в зависимости от типа цепи и производительности [46]; L — длина транспортера, м; $\eta_{\text{п}} = 0,75 \div 0,85$ — КПД передачи.

Таблица 11.1

Коэффициент сопротивления движению

Тип цепи	Производительность, т/ч					
	5	10	20	30	40	50
Втулочно-роликовая	2,2	1,6	1,2	1,1	1,0	1,0
Крычковая	4,2	3,0	2,2	1,8	1,5	1,2

Горизонтальный скребковый транспортер для зерна с погруженными скребками. Мощность электродвигателя для установившегося режима, кВт,

$$P = \frac{P_1 + P_2}{\eta_{\text{п}}} = \frac{P_{\text{уд1}} \cdot L \cdot v + P_{\text{уд2}} \cdot L \cdot Q}{\eta_{\text{п}}}, \quad (11.6)$$

где $P_{\text{уд1}}$ — удельная мощность, необходимая на перемещение тягового органа длиной 1 м по горизонтали со скоростью 1 м/с, кВт/(м²/с) (для зерна и зернопродуктов $P_{\text{уд1}} = 0,08$ кВт/(м²/с)); $P_{\text{уд2}}$ — удельная мощность, необходимая для перемещения продукта при производительности 1 т/ч на расстояние 1 м в горизонтальном направлении, кВт/(м·т/ч), (для зерна $P_{\text{уд2}} = 0,003$ кВт/(м·т/ч)); $P_1 = P_{\text{уд1}} \cdot L \cdot v$; $P_2 = P_{\text{уд2}} \cdot L \cdot Q$; $\eta_{\text{п}}$ — КПД передачи; Q — по (11.4) с учетом того, что $\varphi \approx 1$, но в т/ч.

Винтовой транспортер (шнек) для зерна. Мощность двигателя для привода винтового транспортера, Вт,

$$P = \frac{g \cdot K \cdot Q \cdot (f_c \cdot L_1 + H)}{\eta_{\text{п}}}, \quad (11.7)$$

где Q — производительность, кг/с; $K = 1,2 \div 1,5$ — коэффициент, учитывающий угол наклона транспортера (при $\alpha = 20^\circ$, $K = 1$; $\alpha = 45^\circ$, $K = 1,4$; $\alpha = 90^\circ$, $K = 2,5$); L — длина перемещения продукта, для наклонного транспортера — горизонтальная проекция, м; f_c — коэффициент сопротивления перемещению материала по кожуху (для зерна, продуктов помола, кормов $K = 1,2 \div 1,3$, для навоза $K = 2,5 \div 4$).

Производительность шнекового транспортера, кг/с,

$$Q = 0,25 \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot S \cdot n \cdot \gamma \cdot K_v \cdot \psi \cdot C, \quad (11.8)$$

где D — наружный диаметр винта, м; d — диаметр вала, м; n — частота вращения вала шнека, об/с; γ — насыпная плотность материала, кг/м³; K_v — коэффициент, учитывающий отставание осевой скорости материала от скорости шнека, $K_v = 0,9 \div 0,6$, зависит от рода груза и быстротходности; ψ — коэффициент заполнения винта (для зерна — $0,25 \div 0,35$, для муки — $0,25 \div 0,30$, для полужидких кормовых смесей — $0,9 \div 1,0$, для корнеплодов $\sim 0,4$, для

навоза — $0,6 \div 0,8$); C — коэффициент снижения производительности с увеличением угла α наклона шнека к горизонту (табл. 11.2).

Таблица 11.2

Зависимость $C(\alpha)$

$\alpha,^\circ$	0	5	10	15	20	30	40	50	60	90
C	1	0,9	0,8	0,71	0,65	0,58	0,52	0,48	0,44	0,3

Инерционный транспортер для зерна представляет собой желоб, совершающий возвратно-поступательные колебания под действием привода (кривошипно-шатунного механизма, линейного двигателя (см. главу 5)), благодаря чему продукт перемещается по нему.

Мощность двигателя, кВт

$$P = \frac{p_{уд1} \cdot Q \cdot L}{\eta_{п}}, \quad (11.9)$$

где $p_{уд1}$ — мощность, необходимая для перемещения продукта при производительности 1 т/ч на расстояние 1 м по горизонтали, кВт/(м·т/ч), $p_{уд1} \cong 0,03$ кВт/(м·т/ч); $\eta_{п}$ — КПД передачи; Q — производительность, т/ч.

Ленточные транспортеры используются для перемещения сыпучих, кусковых, штучных грузов в горизонтальном или наклонном направлении. Максимальный угол подъема составляет (градус): 20 для зерна, для гороха — 12, для муки — 24, для силоса и других кормов — 20.

Приводная станция транспортера состоит из электродвигателя, редуктора, ведущего барабана, натяжная станция — из барабана и натяжного устройства. Лента поддерживается равномерно распределенными по длине роликами. Тип передачи (ременная, зубчатая, редуктор) определяется передаточным отношением и условиями работы.

Производительность транспортера, кг/с.

$$Q = \gamma \cdot v \cdot S = q \cdot v, \quad (11.10)$$

где γ — насыпная плотность материала, кг/м³; v — скорость движения ленты, м/с; S — площадь поперечного

сечения слоя материала на ленте, м² (при равномерной загрузке). Загрузка ленты q , кг/м будет

$$\begin{aligned} q &= \gamma \cdot S; \\ Q &= q \cdot v. \end{aligned} \quad (11.11)$$

При неравномерной загрузке

$$q = \frac{m}{l}, \quad (11.12)$$

где m — масса, кг; l — длина, м.

Мощность двигателя (Вт) для установившегося режима

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta_{\text{п}}}, \quad (11.13)$$

где v — скорость движения ленты, м/с; $\eta_{\text{п}}$ — КПД передачи.

Суммарная сила сопротивления движению, Н

$$F = F_{\text{п}} + F_{\text{б}}, \quad (11.14)$$

где $F_{\text{п}}$ — сила сопротивления на прямолинейном участке; $F_{\text{б}}$ — сила сопротивления при огибании барабана [45].

Сила сопротивления на прямолинейном участке движения по настилу

$$F_{\text{пн}} = 9,81(q + q_{\text{л}}) \cdot L \cdot (f_{\text{н}} \cdot \cos \alpha + \sin \alpha), \quad (11.15)$$

где q — загрузка транспортера, кг/м; $q_{\text{л}}$ — масса ленты, кг/м; α — угол подъема; $f_{\text{н}}$ — коэффициент сопротивления движению ленты с настилом, $f_{\text{н}} = 0,4 \div 0,7$ для стального и деревянного настилов.

При роликовых опорах

$$\begin{aligned} F_{\text{пр}} &= [9,81(q + q_{\text{л}} + q_{\text{р}}) \cdot f_{\text{р}} \cdot \cos \alpha + \\ &+ 9,81 \cdot (q + q_{\text{л}}) \cdot \sin \alpha] \cdot L, \end{aligned} \quad (11.16)$$

где $q_{\text{р}}$ — погонная масса роликов нагруженной ветви, кг/м; $f_{\text{р}}$ — коэффициент сопротивления движению по роликам (плоская лента $f_{\text{р}} = 0,018 \div 0,035$; желобчатая $f_{\text{р}} = 0,02 \div 0,04$; при этом большие значения — для худших условий работы).

Сила сопротивления движению при огибании барабанов

$$F_{\text{б}} = \varepsilon \cdot S_{\text{наб}} \cdot K_{\text{б}}, \quad (11.17)$$

где $\varepsilon = 0,06 \div 0,09$ — коэффициент местного сопротивления; $S_{\text{наб}}$ — усилие тяжения набегающей ветви ленты, Н; K_6 — число барабанов.

Транспортеры для уборки навоза (рис. 11.5) работают в кратковременном режиме S3. Условия эксплуатации этих механизмов тяжелые: пуски под нагрузкой, повышенная влажность, химически агрессивная среда, значительные колебания момента сопротивления. Эти особенности следует учитывать при выборе электрооборудования и, прежде всего, электродвигателя — по мощности, исполнению, условиям пуска и перегрузочной способности.

Мощность двигателя для цепочно-скребкового навозоуборщика, Вт,

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta_{\text{п}}}, \quad (11.18)$$

где F — полное усилие на цепи, Н; v — скорость цепи, м/с; $v = 0,15 \div 0,2$ м/с; $\eta_{\text{п}} = 0,75 \div 0,85$.

Полное сопротивление движению, Н,

$$F = q \cdot \frac{Q_{\text{сут}}}{K_{\text{уб}}} \cdot K \cdot f_1 + L \cdot \left(\frac{p}{t_c} + m_{\text{т}} \cdot f_2 \cdot g \right), \quad (11.19)$$

где $Q_{\text{сут}}$ — суточный выход навоза, кг/сут; $K_{\text{уб}}$ — число включений транспортера для уборки навоза в течение

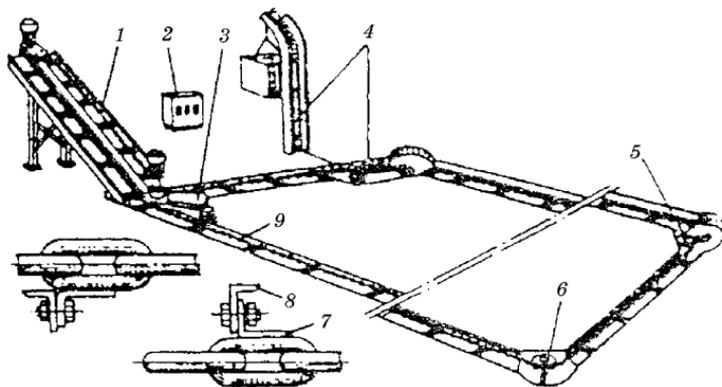


Рис. 11.5

Транспортер скребковый навозоуборочный ТСН-160А:

1 — наклонный транспортер; 2 — шкаф управления; 3 — привод горизонтально-го транспортера; 4 — натяжное устройство; 5, 6 — поворотные устройства; 7 — кронштейны; 8 — скребок; 9 — цепь.

Таблица 11.3

Технические характеристики транспортера ТСН-160

Наименование и единицы измерения показателя	Значение
Подача, т/ч	4,5
Установленная мощность, кВт	5,5
Скорость движения, м/с	0,18
Длина цепи горизонтального транспортера, м	160
Масса транспортера, кг	1890

суток; $K = 3 \div 5$ — коэффициент, учитывающий неравномерность накопления навоза в интервалах между уборками и добавочные усилия, связанные с движением навоза по каналу; f_1 — коэффициент трения навоза о желоб, зависит от материала желоба и подстилочного материала, $f_1 = 0,8 \div 1,2$; p — усилие, приходящееся на один скребок, $p = 15 \div 30$ Н; t_c — шаг скребков, $t_c = 0,2 \div 1,0$ м; $f_2 = 0,4 \div 0,5$ — опытный коэффициент; m_T — масса транспортера длиной 1 м.

В табл. 11.3 приведены технические характеристики скребкового транспортера ТСН-160.

11.3. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ К ПРИВОДНЫМ СТАНЦИЯМ ТРАНСПОРТЕРОВ

Транспортеры в большинстве своем являются нерегулируемыми и нереверсивными механизмами, поэтому для их привода чаще используются короткозамкнутые асинхронные электродвигатели. Частота пусков обычно невелика, выбираются двигатели, предназначенные для продолжительного режима работы. Выбранный по нагреву двигатель (см. главу 7) обязательно проверяется по условиям пуска и перегрузочной способности.

Простота требований к управлению электроприводами транспортеров, связанных с пуском и остановкой приводной станции, предопределила применение схем прямого пуска для транспортеров небольшой длины (до $5 \div 7$ м). Очевидно, что прямой пуск должен производиться при незагруженной ленте (цепи).

Требования к приводам протяженных транспортеров и конвейеров усложняются, так как необходимо учиты-

вать упругие деформации тягового органа, наличие кинематических зазоров между элементами, провисание ленты (цепи). При этом тяговый орган и редуктор могут испытывать значительные динамические нагрузки, приводящие к повышенному износу, а в отдельных случаях и к разрушению звеньев механизма.

В таких линиях следует снижать начальный пусковой момент с целью натяжения тягового органа с последующим увеличением момента и разгоном до рабочей скорости.

В современных электроприводах транспортеров и конвейеров применяются:

- устройства плавного пуска (УПП);
- частотно-регулируемый асинхронный электропривод.

УПП по сути представляет тиристорный регулятор напряжения с системой управления, которые позволяют задавать начальное значение напряжения (и момент), пусковой ток, время пуска, т. е. скорость нарастания напряжения. После пуска УПП может быть зашунтирован и выведен из работы.

Использование преобразователя частоты (ПЧ) позволяет решить как вопросы пуска, так и регулирование скорости, частоты и напряжения. (Подробно применение УПП и ПЧ см. в главах 4, 6, а также [10, 38]).

11.4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО ТРАНСПОРТЕРА

Изображенный на рис. 11.6 горизонтальный ленточный транспортер имеет следующие основные характеристики:

- длина ленты $L = 30$ м;
- загрузка $q = 300$ кг/м;
- удельная масса роликов $q_p = 15$ кг/м;
- удельная масса ленты $q_{л} = 20$ кг/м;
- скорость подачи $v = 0,6$ м/с;
- диаметр барабанов $D_б = 315$ мм.

Конвейер перемещает сухой песок, производительность $Q = 650$ т/ч. Для привода транспортера используется мотор-редуктор (см. рис. 11.6).

Силы сопротивления рассчитываются по формулам (11.14, 11.16, 11.17)

При роликовых опорах ($\alpha = 0$, $\sin \alpha = 0$)

$$F_{\text{пр}} = [9,81(q + q_{\text{л}} + q_{\text{р}})f_{\text{р}} \cdot \cos \alpha + 9,81(q + q_{\text{л}}) \cdot \sin \alpha] \cdot L = \\ = 9,81(300 + 2 \cdot 20 + 15) \cdot 0,25 \cdot 1 \cdot 30 = 2660 \text{ Н.}$$

$$F_{\text{б}} = \varepsilon \cdot S_{\text{наб}} \cdot K_{\text{б}} = 0,075 \cdot 1000 \cdot 2 = 150 \text{ Н.}$$



Рис. 11.6
Ленточный конвейер

Суммарная сила сопротивления

$$F = F_{\text{б}} + F_{\text{пр}} = \\ = 2660 + 150 = 2810 \text{ Н.}$$

Мощность двигателя без учета КПД редуктора и других составляющих сил сопротивления (неосновных)

$$P_{\text{эд}} = \frac{F \cdot v}{\eta} = \frac{2810 \cdot 0,6}{0,9} = 1860 \text{ Вт.}$$

Электродвигатель АИР90Л4,

$$P_{\text{н}} = 2,2 \text{ кВт}, \eta_{\text{н}} = 0,81, \cos \varphi_{\text{н}} = 0,83, s_{\text{н}} = 0,07, M_{\text{н}}^* = 2,1,$$

$$M_m^* = 2,2, I_{\text{н}}^* = 6,5, J_{\text{дв}} = 0,0056 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$n = 1500 \cdot 0,93 = 1395 \text{ об/мин}; M_{\text{н}} = \frac{2200}{147} = 15,0 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции (глава 2).
Лента + груз

$$J = J_{\text{дв}} + m \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 = J_{\text{дв}} + (m_{\text{л}} + m_{\text{н}}) \frac{v^2}{\omega^2} = \\ = 0,056 + (2 \cdot 30 \cdot 20 + 300 \cdot 30) \frac{0,6^2}{147^2} = 0,175 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $m_{\text{л}}$, $m_{\text{н}}$ — масса ленты (удвоенная длина) и нагрузка.

Ролики — полые цилиндры: $R_1 = 0,108 \text{ м}$, $R_2 = 0,05 \text{ м}$ (внешний и внутренний радиусы).

$$J_{\text{р}} = \frac{1}{2} m (R_1^2 - R_2^2) = \frac{1}{2} 15 \cdot 30 (0,108^2 - 0,05^2) = 1,91 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Частота вращения роликов при $v = 0,6 \text{ м/с}$, $n_{\text{р}} = 108 \text{ об/мин}$. Приведенный момент инерции роликов

$$J'_p = J_p \left(\frac{n_p}{n_{эд}} \right)^2 = 1,91 \left(\frac{108}{1395} \right)^2 = 0,0059 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Общий приведенный момент инерции

$$J_\Sigma = J + J_p = 0,175 + 0,0059 = 0,181 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

При моменте трогания $M_{тр} \approx M_H = 15,0 \text{ Н} \cdot \text{м}$, пусковой момент $M_\Pi = 2,1 \cdot M_H = 31,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Следовательно, по условиям пуска двигатель работоспособен. Частота вращения выходного вала редуктора

$$n_2 = \frac{v \cdot 60}{\pi \sigma_\delta} = \frac{0,6 \cdot 60}{\pi \cdot 0,315} = 36,4 \text{ об/мин.}$$

Передаточное число редуктора

$$i_p = \frac{n_{дв}}{n_2} = \frac{1395}{36,4} = 38,3.$$

12 ЭЛЕКТРОПРИВОД КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

12.1. УСТРОЙСТВО, РЕЖИМЫ РАБОТЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ: ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Подъемные краны (мостовые, козловые, кран-балки, тельферы) относятся к подъемно-транспортным машинам циклического действия.

Электроприводы кранов работают в повторно-кратковременном режиме (S3) с большой частотой включений, в запыленных и влажных помещениях, на открытом воздухе при резких изменениях температуры. Следовательно, для обеспечения надежной, безопасной и высокопроизводительной работы выбор систем электропривода, аппаратуры управления и электродвигателей имеет исключительно большое значение.

Конструктивные схемы кранов, используемых в сельскохозяйственном производстве, представлены на рис. 12.1. Основными механизмами кранов являются: механизм передвижения моста (балки); механизм передвижения тележки; механизм подъема груза. Все механизмы оборудуются индивидуальным приводом и электрооборудованием специальной серии [49].

Кинематические схемы передач крановых механизмов представлены на рис. 12.2.

Краны мостового типа предназначены для подъема и перемещения грузов в производственных помещениях, ремонтных мастерских и складов сельскохозяйственной продукции. При грузоподъемности до 5 т краны имеют упрощенную конструкцию, мост выполняется в виде балки двуглаврового сечения, по нижней полке которой перемещается тельфер — подвесная тележка с лебедкой. Элек-

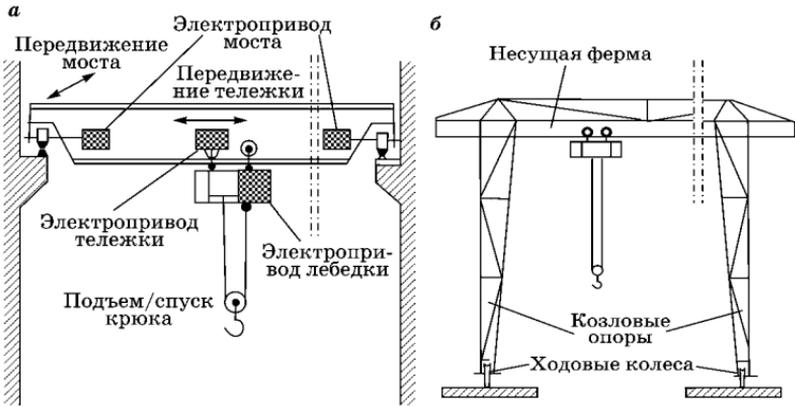


Рис. 12.1 Конструктивные схемы мостовых (а) и козловых (б) кранов

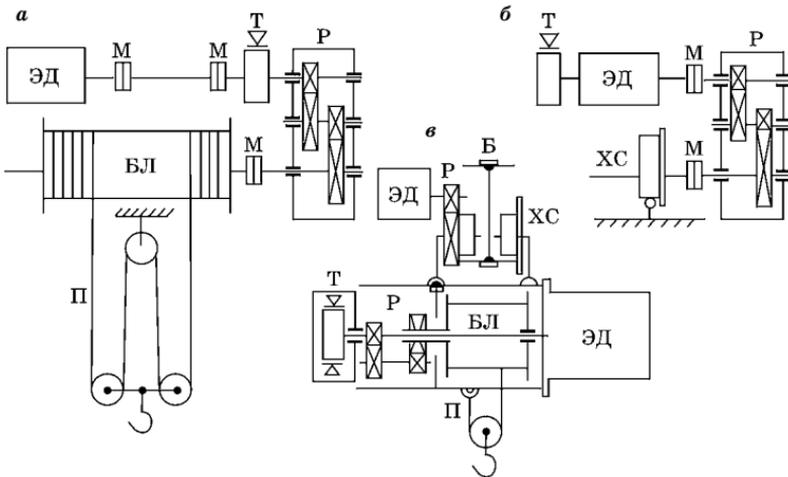


Рис. 12.2 Кинематические схемы передач механизмов подъема (а), горизонтального перемещения (б), тельфера (в):

ЭД — электродвигатель; М — муфта; Т — тормоз; Р — редуктор; БЛ — барабан лебедки; П — полиспаст; ХС — ходовая система.

троприводы механизмов кран-балки управляются оператором с пола при помощи кнопочной станции.

Козловые краны предназначены для работы на открытом воздухе и аналогичны мостовым. Отличительной их особенностью является наличие опор в виде козел, на которые опирается ферма крана.

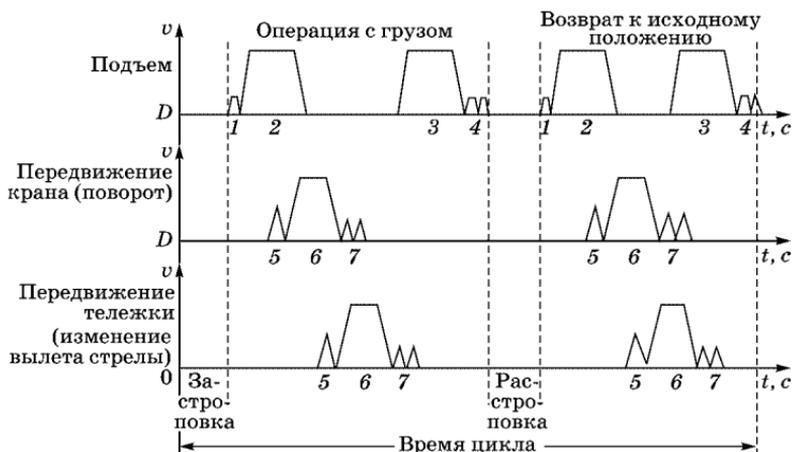


Рис. 12.3

Типовая циклограмма работы мостового и козлового кранов:

1 — обтягивание троса; 2 — подъем груза и крюка; 3 — спуск груза и крюка; 4 — посадка груза и крюка; 5 — гашение раскачки; 6 — горизонтальное движение; 7 — наведение крана в заданные координаты.

Механизмы подъема и передвижения снабжены конечными выключателями, электродвигатели защищены от перегрузок и коротких замыканий максимальными токовыми реле. При этом тепловая защита двигателей не предусматривается во избежание ложных срабатываний при частых включениях.

Все механизмы имеют, как правило, выраженный циклический режим работы. Цикл состоит из времени включения, работы, торможения и паузы (рис. 12.3). Циклы могут постоянно изменяться, это зависит от вида производства.

Все крановые механизмы снабжены тормозами, а механизмы подъема — автоматическими тормозами, действующими при отключении питания. На рис. 12.4 показаны кинематические схемы тормозов. Тормозные устройства должны гарантированно развивать необходимый тормозной момент, например, для механизма подъема тормоз должен развивать момент не ниже 150% номинального.

В крановых механизмах действуют два вида статических нагрузок — потенциальные, обусловленные весом

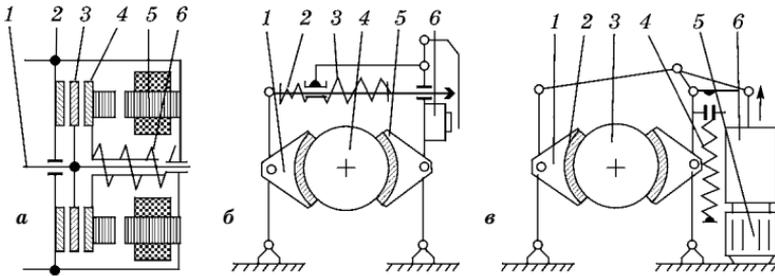


Рис. 12.4

Кинематические схемы тормозов:

a — дискового: 1 — вал электродвигателя, 2 — корпус тормоза, 3 — подвижный диск с фрикционными накладками, 4 — неподвижный диск, 5 — электромагнит привода, 6 — рабочая пружина; *б* — короткоходового колодочного: 1 — тормозная колодка, 2 — демпфирующая пружина, 3 — рабочая пружина, 4 — тормозной шкиф, 5 — фрикционная накладка, 6 — электромагнит привода; *в* — длинноходовой колодочный: 1 — колодка, 2 — фрикционная накладка, 3 — шкиф, 4 — рабочая пружина, 5 — двигатель электрогидравлического толкателя, 6 — гидроцилиндр электрогидравлического толкателя.

груза, и реактивные, связанные с преодолением сил трения. Потенциальный момент не зависит от угловой скорости и направления движения, поэтому электродвигатель при подъеме работает в двигательном режиме, а при спуске, как правило, в тормозном. В реальных механизмах есть еще силы трения, образующие реактивный момент, который зависит от веса груза и скорости вращения лебедки.

Суммарный приведенный к валу двигателя момент сопротивления

$$M_c = M_{\text{п}} + M_{\text{р}} \cdot \text{sign } \omega, \quad (12.1)$$

где $M_{\text{п}}$, $M_{\text{р}}$ — потенциальный и реактивный моменты; $\text{sign } \omega = +1$ — при подъеме и -1 — при спуске.

На рис. 12.5 представлены механические характеристики механизмов подъема (*a*) и горизонтального перемещения (*б*), а заштрихованные зоны определяют области изменения момента. Условием возникновения тормозного режима во всех приводах является неравенство $M_{\text{р}} < M_{\text{п}}$. Если вес опускаемого груза мал и $M_{\text{р}} > M_{\text{п}}$, то спуск будет силовым.

В механизмах горизонтального перемещения основными являются реактивные нагрузки, связанные с силами трения колес о направляющие.

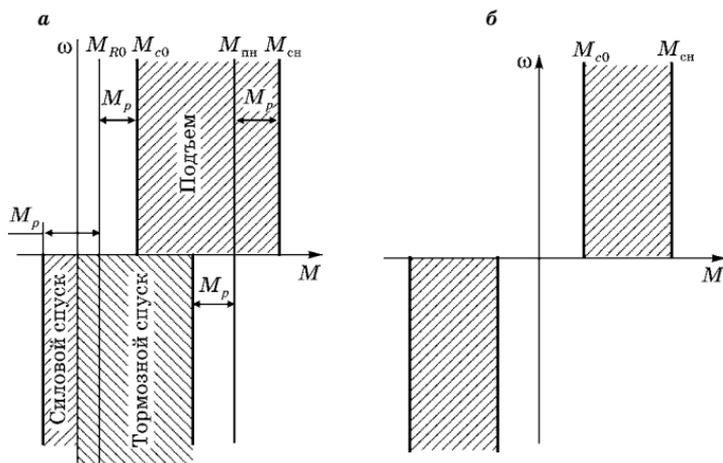


Рис. 12.5
Механические характеристики:

a — механизм подъема; *б* — горизонтального перемещения.

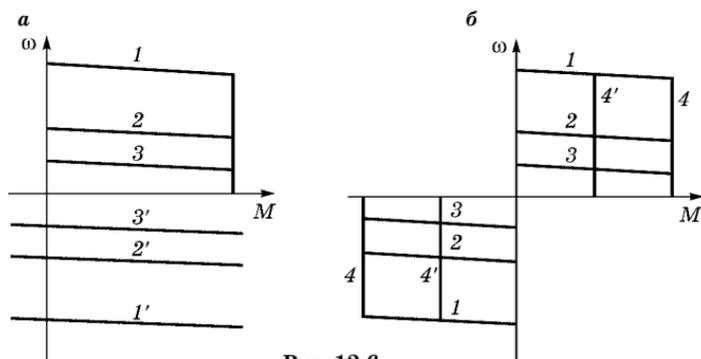


Рис. 12.6
Наиболее предпочтительные механические характеристики:
a — механизмов подъема; *б* — горизонтального перемещения.

С учетом специфики режимов работы крановых механизмов для их электроприводов желательны механические характеристики, приведенные на рис. 12.6. Характеристики *1* и *1'* — для перемещения грузов с номинальной скоростью; *2* и *2'* — с пониженной скоростью; *3* и *3'* — для точной остановки и посадки груза. Мягкие характеристики *4* и *4'* ограничивают момент двигателя допустимым значением, а также позволяют регулировать момент в переходных режимах.

12.2. НАГРУЗКИ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

Электроприводы крановых механизмов имеют целый ряд конструктивных особенностей и отличаются режимами работы, поэтому методы расчета и выбора оборудования отличаются от классических. Несмотря на большое многообразие конкретных установок, их рабочие движения реализуются ограниченным числом однотипных механизмов и электроприводов. Это дает возможность раскрыть практически все особенности приводов крановых механизмов на примере мостового крана с напольным управлением. Управляя краном, оператор должен иметь возможность задавать направление и скорость перемещения рабочего органа, а приводы механизмов — отвечать ряду требований [49, 51].

Электропривод должен обеспечить регулирование скорости в широком диапазоне, позволяющем оператору управлять перемещением груза с требуемой точностью. Для большинства кранов удовлетворительная управляемость обеспечивается в диапазоне $D = 2 \div 3$. В настоящее время используется в основном ступенчатое регулирование для механизмов передвижения моста (длинный цех, склад, мастерская). В механизмах подъема и перемещения тележки регулирование скорости, как правило, не применяется.

Электропривод должен обеспечить ограничение момента двигателя допустимыми значениями (по допустимому ускорению), снижение динамических нагрузок механического оборудования, обусловленных упругими связями (грузовой канат) и зазорами в передачах.

Нагрузки делятся на статические и динамические. Статические нагрузки (установившийся режим) — это подъем, спуск и перемещение грузов. Динамические нагрузки (переходные режимы) характерны для пуска и торможения.

Статический момент (Н·м) и мощность (кВт) на валу двигателя

$$M_c = \frac{g \cdot (m_0 + m_x) \cdot D_{\text{л}}}{2 \cdot i_{\text{п}} \cdot i_{\text{р}} \cdot \eta};$$

$$P_c = \frac{g \cdot (m_0 + m_x) \cdot v_{\text{п}}}{\eta \cdot 10^3}, \quad (12.2)$$

где m_0 и m_x — масса грузозахватного устройства и поднимаемого груза, кг; $D_{\text{л}}$ — диаметр барабана лебедки, м; $i_{\text{п}}$ — кратность полиспаста; $i_{\text{р}}$ — передаточное число редуктора; η — общий КПД передачи в режиме подъема; $v_{\text{п}}$ — скорость подъема, м/с; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

При тормозном спуске формулы аналогичны (12.2), но КПД η должен быть в числителе в силу изменения направления потока энергии. Отметим, что КПД передачи зависит от загрузки, изменяется в пределах $0,4 \div 0,9$ (рис. 12.7).

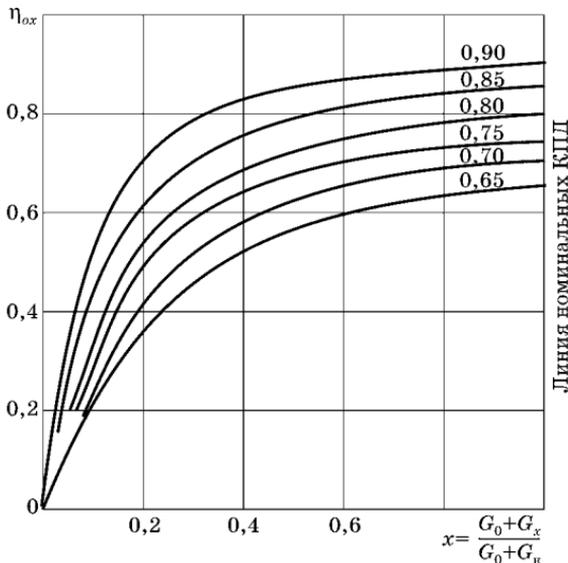


Рис. 12.7
Зависимости КПД передач в функции загрузки

Динамический момент двигателя должен обеспечить требуемое технологическими условиями ускорение:

$$M_{\text{д}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = J_{\Sigma} \frac{2 \cdot i_{\text{п}} \cdot i_{\text{р}}}{D_{\text{л}}} a_{\text{расч}}, \quad (12.3)$$

где J_{Σ} — суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции; $a_{\text{расч}} = \frac{dv}{dt}$ — расчетное ускорение, м/с².

В табл. 12.1 приведены характеристики параметров движения крановых механизмов, полученные на основе их эксплуатации.

Таблица 12.1

Характеристики параметров движения

Группа режимов крана	Грузоподъемность, т	Номинальная скорость, м/с			Минимальная скорость, м/с			Расчетное ускорение, м/с ²	
		Подъем груза	Передвижение тележки	Передвижение моста	Опускание груза	Передвижение тележки	Передвижение моста	Передвижение тележки	Передвижение моста
1К, 2К	1–5	0,1–0,15	До 0,2	До 0,8	0,04	0,25	0,25	0,1	0,15
3К		0,1–0,15	0,35–0,5	0,6–0,8	0,05	0,2	0,25	0,2	0,25

Таблица 12.2

Классификация характеристик режимов

Группы режимов механизмов	ПВ%	Нормированное среднесменное число включений в час	Расчетное время работы в году, не более, час	Интенсивность использования, число включений за время 600 с наиболее интенсивного использования	Среднесуточное время работы механизма, час	Время включений на малых скоростях или толчков включений, % среднесуточного времени
1М	15	60	250	50	До 1	60
2М	15	60	250	50	1÷2	50
3М	25	90	500	60	2÷3	35
4М	40	120	1000	80	3÷4	25

Всего установлено 8 режимных групп кранов (1К÷8К) и 6 режимных групп механизмов крана (1М÷6М). Классификационные характеристики режимов приведены в табл. 12.2.

В механизмах подъема с малыми скоростями перемещения грузов (большое передаточное число редуктора) суммарный приведенный момент инерции лишь на 10÷30% больше момента инерции ротора двигателя. Поэтому ди-

намическая составляющая момента двигателя весьма мала и в механизмах подъема M_d не рассчитывается.

Для горизонтального перемещения в установившемся режиме момент и мощность (кВт) на валу двигателя

$$M_c = \frac{k \cdot g \cdot (m + m_1) \cdot (\mu \cdot r + f)}{i \cdot \eta \cdot n}; \quad (12.4)$$

$$P_c = \frac{k \cdot g \cdot (m + m_1) \cdot (\mu \cdot r + f) \cdot v}{10^3 \cdot R \cdot \eta \cdot n}, \quad (12.5)$$

где $k = 1,3 \div 1,4$ — коэффициент трения ребер колес о рельсы; m_1 — масса передвигающегося механизма; m — масса груза; r — радиус шейки оси колеса; $f = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м — коэффициент трения качения; i — передаточное отношение редуктора; η — КПД; R — радиус колеса, м; $\mu = 0,015$ — коэффициент трения скольжения; n — число приводов конструкции.

Важнейшей особенностью механизмов горизонтального перемещения является большая механическая инерция, поэтому при высокой частоте включений динамические нагрузки могут определять мощность двигателей. Дополнительно к сказанному — динамический момент является переменной величиной вследствие раскачивания подвешенного груза.

12.3. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

Повторно-кратковременный режим работы крановых механизмов с частыми пусками, электрическими торможениями и толчковыми включениями требует применения специальных крановых двигателей. По этим же причинам значительную часть потерь энергии в электродвигателях составляют потери, обусловленные динамическими режимами (см. главу 6). При этом их величина во многом зависит от суммарного момента инерции электропривода. В механизмах подъема основную долю момента инерции составляет момент инерции ротора двигателя, поэтому в крановых механизмах используют двигатели с минимально возможной инерцией (уменьшение диаметра ротора при увеличении его длины).

В повторно-кратковременном режиме по условиям нагрева двигателя может быть допущена бóльшая нагрузка, чем в продолжительном. При пуске под нагрузкой двигатель должен развивать повышенный пусковой момент, обеспечивая требуемое ускорение, поэтому двигатели крановых механизмов должны иметь более высокую перегрузочную способность. Это важно и в связи с тем, что двигателю приходится преодолевать кратковременные динамические перегрузки при отрыве груза.

Теплоотдача самовентилируемых электродвигателей в повторно-кратковременном режиме меньше, чем в продолжительном, так как количество охлаждающего обремененную поверхность двигателя воздуха зависит от его скорости. Следовательно, допустимая нагрузка должна быть снижена.

Указанные выше особенности определяют необходимость использования в электроприводах крановых механизмов специальных электродвигателей, номинальным режимом которых является повторно-кратковременный режим.

В повторно-кратковременном режиме при работе с номинальной нагрузкой температура двигателя колеблется на уровне допустимого значения, увеличиваясь во время работы и уменьшаясь во время паузы. Причем отклонение температуры от допустимой тем больше, чем выше при данной ПВ продолжительность цикла и меньше постоянная времени нагрева двигателя. Чтобы ограничить возможную максимальную температуру двигателей, ограничивают продолжительность цикла. Для отечественной серии двигателей время цикла установлено равным 600 с. Номинальная мощность двигателей устанавливается для 4 стандартных ПВ—15,25,40 и 60%.

Промышленность выпускает ряд серий двигателей повторно-кратковременного режима. Асинхронные крановые двигатели с короткозамкнутым ротором серии 4МТКФ и металлургические серии 4МТКН имеют удлиненный ротор, позволяющий снизить момент инерции, и повышенное скольжение ($s = 0,07 \div 0,12$), уменьшающее долю потерь, выделяющихся в статорной обмотке (см. главу 6).

Перегрузочная способность двигателей этих серий составляет $2,3 \div 3,0$ при ПВ 40%. Эта продолжительность включения для крановых и металлургических двигателей принята за основную. Номинальные мощности двигателей при ПВ = 40% лежат в диапазоне от 2,2 кВт до 22 кВт для серии 4МТКФ и от 2,2 кВт до 37 кВт для серии 4МТКН.

Двигатели указанных серий могут иметь многоскоростное исполнение с двумя и тремя обмотками на статоре, с числом полюсов 6/12, 6/16 и 6/20 и номинальной мощностью $3,5 \div 30$ кВт при ПВ = 40% для серии 4МТКН и с числом полюсов 4/12, 4/24, 4/8/24 и номинальной мощностью $4 \div 30$ кВт при ПВ = 25% для серии 4МКТР (Приложение, табл. 13–15).

Для грузоподъемных кранов с режимными группами механизмов 1М...3М и электрических талей применяются электродвигатели серии 4АС талевого и кранового исполнения — с повышенным скольжением и встроенными тормозами. По параметрам и механической прочности они соответствуют условиям работы в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и торможениями. Диапазон мощностей составляет $0,6 \div 16$ кВт при ПВ = 40%. Широкое применение находят также двухскоростные электродвигатели серии 4А с двумя отдельными обмотками и встроенными тормозами, с числом полюсов 4/12 и 4/16 и диапазоном номинальных мощностей $0,25 \div 7,5$ кВт при ПВ = 40%.

Встроенные в двигатели механические тормоза не рассчитаны на частые торможения механизмов с большим приведенным моментом инерции (механизмы горизонтального перемещения). Поэтому процесс торможения должен осуществляться преимущественно электрическим двигателем или с использованием режима свободного выбега механизма (самоторможения).

Исходными данными для выбора электродвигателей крановых механизмов являются приведенные к валу электродвигателя статические и динамические нагрузки, характеристики режима работы крана и его механизмов, а также их кинематические и инерционные характеристики.

Выбор двигателя кранового механизма осуществляется на основе его предварительного определения по известным статическим нагрузкам, проверки обеспечения необходимого динамического момента по заданному ускорению и заключительной оценки по тепловому состоянию с учетом пусков и толковых включений. На каждом этапе проверки может быть осуществлена коррекция мощности выбираемого двигателя.

Решение задачи выбора двигателя по мощности осложняется неопределенностью нагрузочных характеристик. Основой в таком случае может служить расчетный цикл стандартной продолжительности при стандартной ПВ, соответствующей той режимной группе, к которой отнесен механизм. При этом предполагается, что крановый механизм перемещает либо номинальный груз, либо одно грузозахватное устройство, а время перемещения груза равно времени перемещения одного грузозахватного устройства.

При продолжительности цикла, не превышающей 600 с, можно считать, что в установившемся тепловом режиме изменение температуры двигателя в пределах одного цикла сравнительно мало. Это дает возможность на расчетной нагрузочной диаграмме (рис. 12.8а) объединить вместе все участки работы и все паузы и представить нагрузочные диаграммы в виде, изображенном на рис. 12.8б, в.

Эквивалентный момент на валу электродвигателя механизма подъема в соответствии с расчетной нагрузочной диаграммой (рис. 12.8) при равенстве интервалов t_i определяется по формуле

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_{\text{сн}}^2 \cdot t_{\text{p1}} + M_{\text{ст}}^2 \cdot t_{\text{p2}} + M_{\text{со}}^2 \cdot t_{\text{p3}} + M_{\text{сос}}^2 \cdot t_{\text{p4}}}{t_{\text{p1}} + t_{\text{p2}} + t_{\text{p3}} + t_{\text{p4}}}}, \quad (12.6)$$

где $M_{\text{сн}}$ — номинальный момент при подъеме груза; $M_{\text{ст}}$ — номинальный момент при опускании груза; $M_{\text{со}}$ — момент при подъеме только грузозахватного устройства; $M_{\text{сос}}$ — то же при спуске.

Поскольку интервалы времени $t_{\text{p}i}$ равны между собой, то окончательно

$$M_{\text{э}} = \frac{1}{2} \sqrt{M_{\text{сн}}^2 + M_{\text{ст}}^2 + M_{\text{со}}^2 + M_{\text{сос}}^2}. \quad (12.7)$$

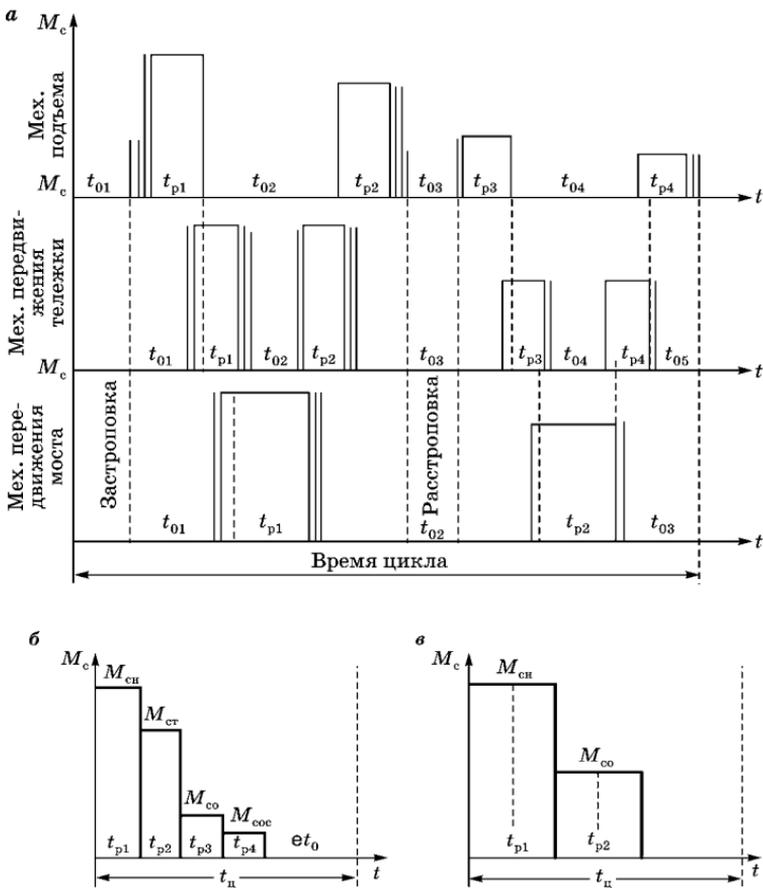


Рис. 12.8
Условные (а) и расчетные (б, в) нагрузочные диаграммы крановых механизмов

Для механизмов горизонтального перемещения эквивалентный момент находят по расчетной нагрузочной диаграмме механизма подъема (рис. 12.8в)

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_{\text{сн}}^2 \cdot t_{\text{p1}} + M_{\text{со}}^2 \cdot t_{\text{p2}}}{t_{\text{p1}} + t_{\text{p2}}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{M_{\text{сн}}^2 + M_{\text{со}}^2}. \quad (12.8)$$

Если принять в расчетной нагрузочной диаграмме механизма подъема

$$M_{\text{снт}} \approx M_{\text{сн}}, \text{ а } M_{\text{соc}} \approx M_{\text{со}},$$

то формула (12.8) для расчета эквивалентного момента может считаться общей для всех механизмов крана. Введя понятие средней относительной загрузки кранового механизма (12.9), формулу (12.8) можно представить в окончательном виде, позволяющем выполнить расчет эквивалентного момента по (12.10), зная только момент номинального груза и среднюю относительную загрузку

$$\mu_c = \frac{M_{\text{сн}} + M_{\text{со}}}{2M_{\text{сн}}}; \quad (12.9)$$

$$M_э = \frac{M_{\text{сн}}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{M_{\text{со}}}{M_{\text{сн}}}\right)^2} = 0,707 \cdot M_{\text{сн}} \sqrt{1 + (2\mu_c - 1)^2}. \quad (12.10)$$

Аналогично рассчитывают и эквивалентную мощность:

$$P_э = 0,707 \cdot P_{\text{сн}} \sqrt{1 + (2\mu_c - 1)^2}. \quad (12.11)$$

Средняя относительная загрузка выбирается в следующих пределах: для механизма подъема $\mu_c = 0,56 \div 0,6$, если в качестве грузозахватного устройства применяется крюк; $\mu_c = 0,7 \div 0,8$, если применяется грейфер; для механизма передвижения тележки $\mu_c = 0,6 \div 0,7$, а для механизма передвижения моста $0,7 \div 0,9$. Большие значения соответствуют перемещению более тяжелых конструкций крана.

Предварительный выбор электродвигателя осуществляется в соответствии с неравенством

$$P_n \geq K_э P_э = K_э M_э \omega_p, \quad (12.12)$$

где P_n — номинальная мощность двигателя по каталогу при заданной для механизма расчетной продолжительности включения; $K_э$ — коэффициент запаса, позволяющий учесть динамические нагрузки, $K_э = 1,1 \div 1,5$, причем меньшие значения выбираются при определении мощности двигателей механизма подъема, а большие — механизма передвижения моста; ω_p — рабочая угловая скорость электродвигателя.

Более точная проверка двигателя по условиям нагрева по сравнению с проверкой по (12.10) может быть выпол-

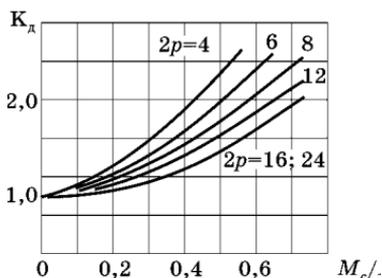


Рис. 12.9

Зависимость коэффициента динамических потерь для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

нена методом средних потерь (см. главу 7), с учетом потерь в установившихся режимах. При этом их составляющую при пуске, вызванную преодолением момента нагрузки позволяет учесть коэффициент динамических потерь K_d , значения которого приведены на рис. 12.9. Тогда суммарные потери в обмотке ротора при пуске

$$\Delta W_{\text{п}} = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot K_d. \quad (12.13)$$

Отметим, что должна быть проверена перегрузочная способность выбранного двигателя для обеспечения расчетного ускорения при возможности отклонения напряжения ΔU . Такая проверка обязательна для привода передвижения моста как наиболее инерционной конструкции.

12.4. РАСЧЕТ И ВЫБОР ПУСКОРГУЛИРОВОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

В электроприводах крановых механизмов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями добавочные сопротивления в цепи обмотки статора применяются для обеспечения пусковых режимов путем ограничения момента (рис. 12.10). Известно, что между пусковыми моментами на естественной $M_{\text{пе}}$ и искусственной $M_{\text{пн}}$ механических характеристиках справедливо соотношение

$$\frac{M_{\text{пн}}}{M_{\text{пе}}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{U_{\text{н}}^2} = \frac{I_{\text{пн}}^2}{I_{\text{пн}}^2}, \quad (12.14)$$

где $U_{\text{н}}$, $I_{\text{пн}}$ — текущие значения напряжения и пускового тока; $U_{\text{н}}$, $I_{\text{пн}}$ — номинальные значения. Обычно значения пусковых токов задаются в долях от номинального,

$K_I = \frac{I_{\text{пн}}}{I_{\text{пн}}}$. Следовательно, величина добавочного сопротивления в цепи обмотки статора

$$R_d = \sqrt{Z_{ки}^2 - X_k^2} - R_k, \quad (12.15)$$

где $Z_{ки} = \frac{U_{и}}{I_{пи}}$ — полное сопротивление обмотки (фазы) статора при напряжении $U_{и}$; $Z_{ки} = \sqrt{(R_d + R_k)^2 + X_k^2}$, R_k , X_k — сопротивления короткого замыкания схемы замещения (из справочника).

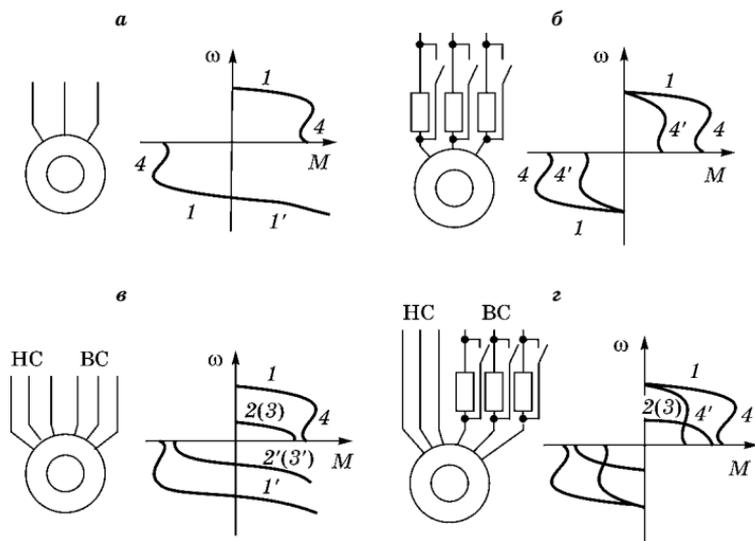


Рис. 12.10

Основные типы электроприводов кранов с напольным управлением и механические характеристики:

a — на основе нерегулируемого асинхронного короткозамкнутого двигателя; *б* — включением добавочных сопротивлений в цепь обмотки статора; *в* — с переключением числа пар полюсов; *з* — комбинированная система.

На практике натяжение канатов производится при токах $I_{пи} = (0,3 \div 0,5)I_{пн}$. Затем сопротивления выводятся, и двигатель работает при $U = U_{н}$ (рис. 12.10б, з).

Выбранные таким образом резисторы должны быть проверены по тепловому состоянию. Выбираемый резистор не будет перегреваться, если действительный ток кратковременного $I_{кр}$ или повторно-кратковременного $I_{пк}$ режимов не превышает допустимых значений при соответствующих стандартных продолжительностях включения (режим S2) или ПВ (режим S3)

$$\begin{aligned} I_{кр} &\leq I_n \cdot K_{кр} \\ I_{пк} &\leq I_n \cdot K_{пк}, \end{aligned} \quad (12.16)$$

где $K_{кр}$ и $K_{пк}$ — коэффициенты перегрузки резисторов, которые зависят от постоянной времени нагрева (рис. 12.11).

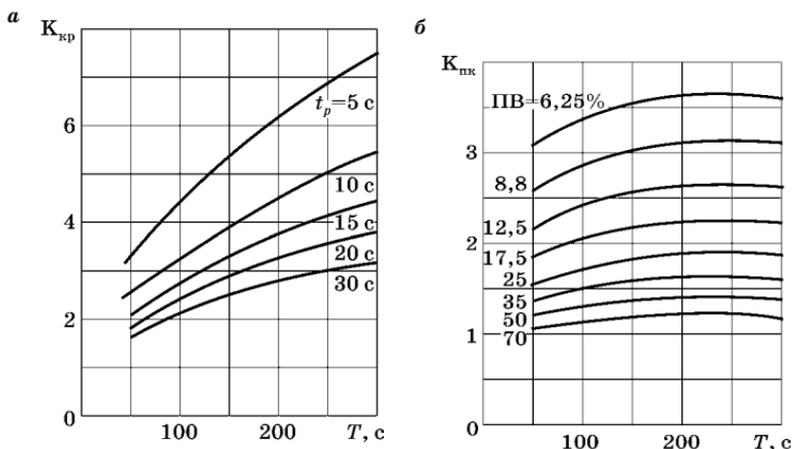


Рис. 12.11

Значения коэффициента перегрузки резисторов в кратковременном (а) и повторно-кратковременном (б) режимах в зависимости от постоянной времени

12.5. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

Подъемные краны имеют неавтоматизированный рабочий цикл, который на всех этапах осуществляется под контролем и по командам оператора. Поэтому управление электроприводами таких кранов должно быть предельно простым, причем получение простых решений часто связано со снижением требований к статическим и динамическим свойствам электроприводов.

Наиболее простые схемы с нерегулируемыми асинхронными двигателями имеют электроприводы механизмов тельфера. Они управляются при помощи реверсивных магнитных пускателей и кнопочной станции, подвешенной на гибком кабеле (рис. 12.12).

Подвод питания к схеме осуществляется через автоматический выключатель QF и кабель (кабель-штору). Напряжение на электродвигатель M1 привода механизма

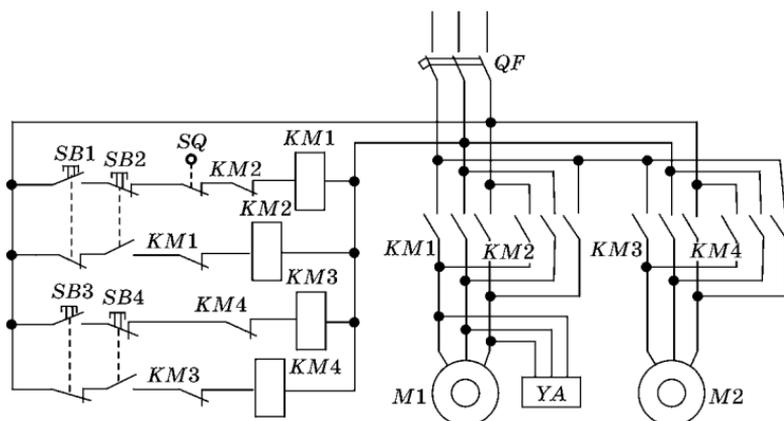


Рис. 12.12

Схема управления электроприводом механизма подъема и горизонтального перемещения тельфера

подъема и электромагнитный привод YA тормозного устройства подается через контакты реверсивного магнитного пускателя $KM1$ и $KM2$ с помощью кнопок $SB1$ и $SB2$.

В схеме кнопочной станции не применяется шунтирование кнопок замыкающими блок-контактами магнитных пускателей, поэтому для предотвращения ухода тельфера от оператора весь период работы электродвигателя необходимо держать кнопку во включенном состоянии.

Перемещение грузозахватного устройства при подъеме ограничивается конечным выключателем SQ .

Управление электродвигателем $M2$ механизма перемещения тельфера осуществляется аналогично кнопками $SB3$ и $SB4$.

На рис. 12.13 представлена схема управления электроприводом механизма подъема с двухскоростным короткозамкнутым двигателем M с двумя независимыми обмотками. Управление приводом осуществляется кнопочной станцией с двухходовыми кнопками.

Тихоходная обмотка электродвигателя получает питание через контакты линейного контактора $KM1$, контакты контакторов направления $KM2$, $KM3$ и размыкающие контакты контактора $KM4$ после нажатия соответствующей кнопки $SB1$ или $SB2$ (первое положение).

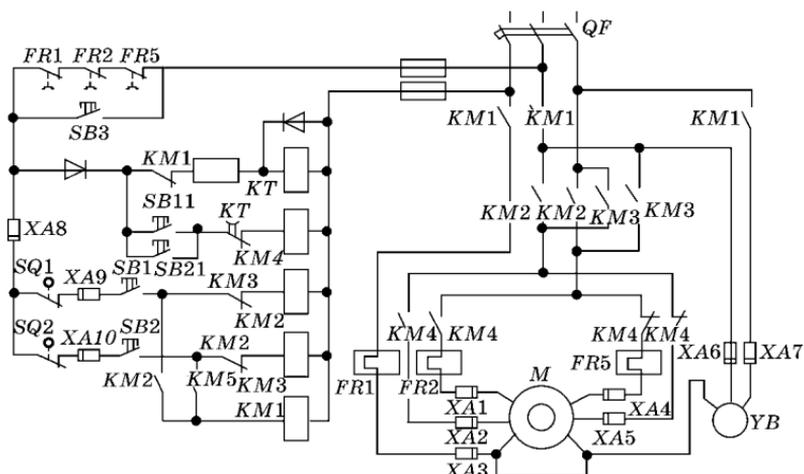


Рис. 12.13

Схема управления электроприводом механизма подъема на основе двухскоростного электродвигателя

При дальнейшем нажатии кнопок замыкаются контакты SB11 или SB21 (второе положение) и получает питание контактор KM4, происходит переключение напряжения с обмотки низшей скорости на обмотку высшей скорости. При этом не может быть положения, когда быстроходная и тихоходная обмотки отключены одновременно. При быстром переводе кнопок из отключенного состояния во второе положение переход с тихоходной обмотки на быстроходную происходит под контролем электромагнитного реле времени КТ. При срабатывании конечных выключателей SQ1 или SQ2 происходит отключение обмоток электродвигателя и привода тормоза YB. На рис. 12.13, 12.14 XA1, XA2, ..., XA9 — скользящие контакты.

Электроприводы механизмов передвижения могут иметь одно- и двухдвигательное исполнение. Двухдвигательные электроприводы применяются для привода мостов с большим пролетом и соответственно широкой колеей ходовой системы, когда передача движения длинным валом становится нецелесообразной.

На рис. 12.14 представлена схема электропривода передвижения с двумя односкоростными короткозамкнутыми двигателями и двухступенчатым реостатным регули-

путем нажатия на кнопку противоположного направления движения до первого упора. В течение времени, определяемого установкой реле КТ, двигатель включается на противоположное направление вращения через две ступени тех же резисторов R. При срабатывании конечных выключателей SQ1 или SQ2 происходит отключение линейного контактора защиты и накладываются тормоза.

На рис. 12.15 представлена схема электропривода механизма передвижения с использованием двухскоростных электродвигателей с одной ступенью регулировочных резисторов. Кнопками SB1 или SB2 включаются контакторы направления KM1 или KM2, а также контактор малой скорости KM4. Одновременно через контактор KM3 получают питание приводы тормозов YB1 и YB2. Для перехода на высшую скорость замыкаются контакты SB11 или SB21 двухходовых кнопок и включается контактор KM6. Напряжение подается на обмотки высшей скорости через резисторы (мягкий пуск), при этом

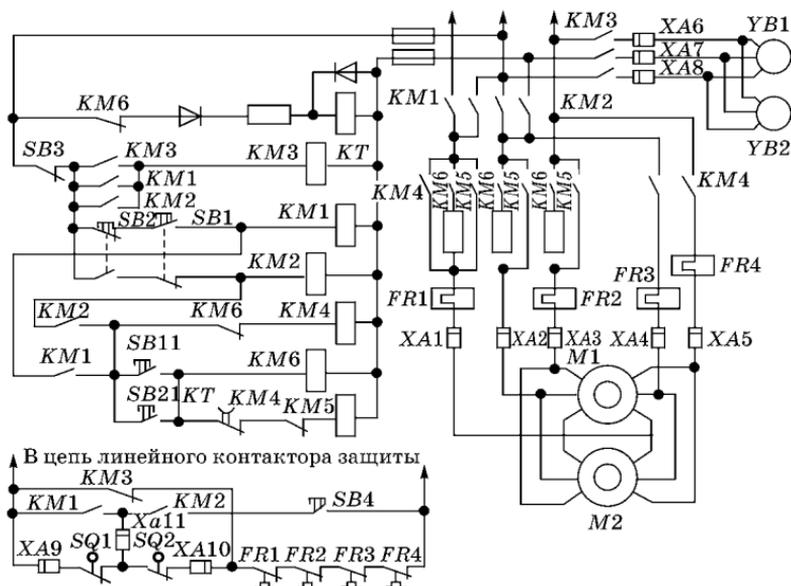


Рис. 12.15

Схема управления электроприводом механизма передвижения с двухскоростным электродвигателем и реостатным регулированием

тихоходная обмотка теряет питание. Ступень резисторов шунтируется контактором КМ5 через время, определяемое уставкой реле КТ, и двигатель выходит на естественную характеристику.

При отключении двигателя от сети при отпускании кнопок тормоза продолжают получать питание, и имеет место свободный выбег. Электрическое торможение может быть осуществлено при переходе с высшей скорости на низшую нажатием кнопок SB1 или SB2 того же направления движения. Отключается привод тормоза нажатием кнопки SB3. При срабатывании конечных выключателей и размыкании линейного контактора защиты происходит отключение электродвигателей и наложение тормозов. Механизм тормозится с максимальной интенсивностью. Применение резисторов в цепи быстроходной обмотки позволяет осуществить сравнительно плавный пуск, однако тормозной момент не регулируется и в этом случае плавность торможения может быть достигнута применением толчковых включений.

В процессе движения крановые механизмы подвержены вибрациям и ударам. Поэтому возможность повреждения проводов и кабелей на кранах выше, чем на стационарных установках. Кроме того, на большинстве кранов токоподвод к тележкам (тельферам) выполняется с помощью гибких кабелей, возможность повреждения которых полностью устранить невозможно. Поэтому первым видом защит, применяемых на кранах, является защита подводящих линий от коротких замыканий. Она выполняется с применением установочных автоматических выключателей в силовых цепях и предохранителей в цепях управления.

Важной задачей защиты является предотвращение недопустимых нагрузок в цепях электродвигателей при заклинивании механизмов, обрыве цепей питания приводов тормозных устройств и др. В последнее время защита от таких режимов стала выполняться тепловыми реле в главных цепях двигателей (реле FR (КК) на рис. 12.13–12.15). Защита электродвигателей от перегрузок при затяжных пусках и торможениях не может быть эффективно

решена на основе простых средств из-за неопределенности нагрузок крановых механизмов. Единственным условием предотвращения перегрузок является правильный выбор электродвигателя с учетом всех возможных эксплуатационных режимов.

Особенностью кранов с напольным управлением является возможность доступа на кран для ремонта и обслуживания только в специально отведенной ремонтной зоне, оборудованной площадками осмотра. Поэтому схема защиты строится так, чтобы контакты защитных реле могли быть зашунтированы специальной кнопкой (SB3 на рис. 12.13 и SB4 на рис. 12.14 и 12.15) и кран в аварийных условиях мог быть доведен до ремонтной зоны при отсутствии в схеме коротких замыканий. По этой же причине автоматические выключатели и предохранители на подвижных конструкциях не устанавливаются, а монтируются в стационарных шкафах.

12.6. ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

В последнее время наметилась тенденция к использованию в подъемно-транспортных механизмах частотно-регулируемых электроприводов. Существующая система приводов с реостатно-контакторным управлением обладает следующими недостатками:

1) использование асинхронных двигателей с фазным ротором и реостатным управлением не обеспечивает требуемых регулировочных характеристик и плавности;

2) способ реостатного регулирования имеет низкую эффективность по энергопотреблению;

3) релейно-контакторное управление для регулирования частоты вращения обладает невысокой надежностью и быстрым износом в режиме S3;

4) значительное потребление реактивной мощности, $\cos \varphi \leq 0,5 \div 0,6$.

Переход на частотное управление обеспечивает следующие преимущества:

1) плавное регулирование скорости во всем диапазоне;

2) контролируемый плавный разгон и торможение двигателей, что приводит к существенному снижению динамических нагрузок, увеличению надежности и срока службы, точной и безопасной установке груза;

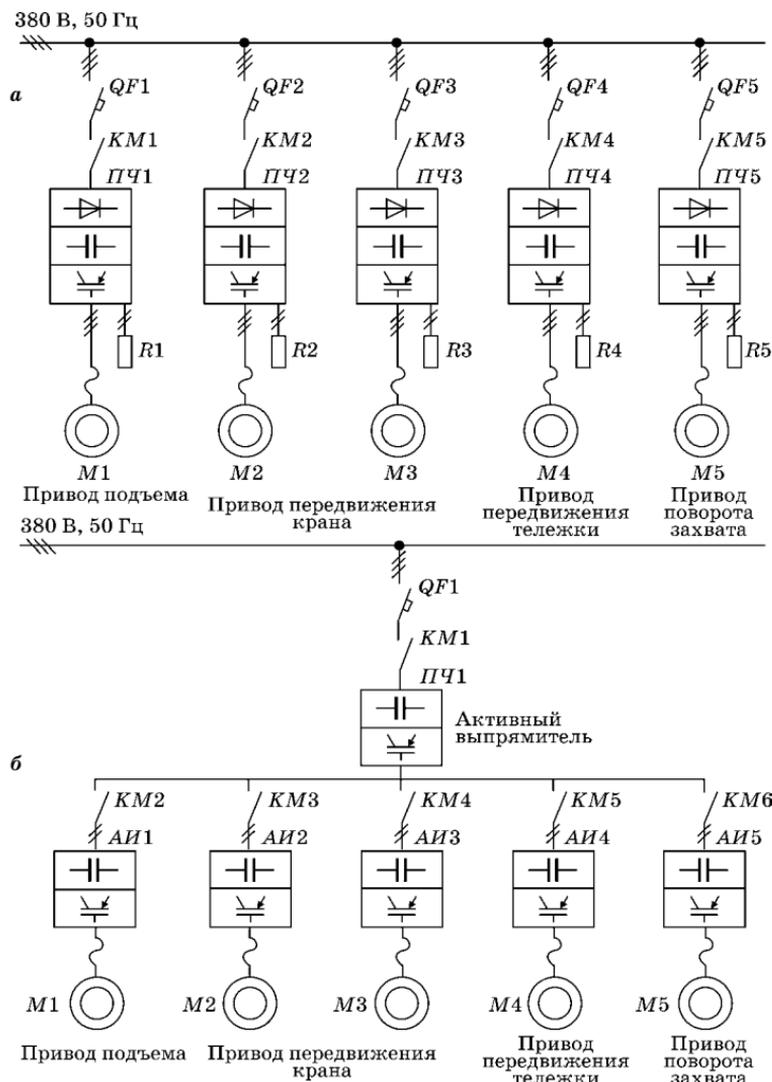


Рис. 12.16

Варианты упрощенной схемы электрооборудования козлового контейнерного крана без рекуперации (а) и с рекуперацией (б) энергии в сеть

3) высокое качество регулирования скорости всех механизмов;

4) повышение коэффициента мощности почти до (0,9÷0,95), так как современные ПЧ практически не потребляют реактивной мощности;

5) экономия электроэнергии в связи с отказом от параметрического регулирования, а также уменьшение потерь в двигателях при пусках;

6) широкие возможности программной настройки параметров работы механизмов, контроля работы, диагностики неисправностей.

На рис. 12.16 представлены два варианта использования частотно-регулируемого электропривода для крановых механизмов [10]. В первом случае (рис. 12.16а) применен двухзвенный ПЧ с неуправляемым выпрямителем, тормозными модулями и резисторами R1–R5.

Во втором варианте (рис. 12.16б) используется ПЧ с активным выпрямителем, позволяющим осуществлять рекуперацию энергии в сеть, общее звено постоянного тока и индивидуальные инверторы для питания каждого двигателя. Основное преимущество такой структуры — возможность возврата энергии в сеть в тормозных режимах, при спуске груза.

Для управления краном применяется программируемый контроллер.



Рис. 12.17

Диаграммы относительного потребления энергии в электроприводах подъема (а) и перемещения тележки (б) крана

Переход к частотному управлению скоростью короткозамкнутого двигателя взамен реостатного обеспечивает снижение потерь во всех режимах работы механизмов. Так, пусковые потери могут быть снижены в 5–10 раз, при работе на пониженных скоростях это обусловлено практическим постоянством абсолютного скольжения, а потери при тормозном спуске груза могут быть снижены в 15–20 раз. Исключение режима противовключения позволяет в 2–3 раза снизить потери в тормозных режимах [10, 39].

На рис. 12.17 приведены диаграммы относительного потребления энергии электроприводами подъема и перемещения тележки ($PВ = 40\%$, 120 включений в час) с использованием ПЧ с отдачей энергии в сеть [10].

13 ЭЛЕКТРОПРИВОД МАШИН С КРИВОШИПНО-ШАТУННЫМ МЕХАНИЗМОМ

13.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В сельскохозяйственном производстве используется целый ряд механизмов, в состав передачи которых входит кривошипно-шатунное устройство, преобразующее вращательное движение вала электродвигателя в возвратно-поступательное движение рабочего органа. К таким механизмам относятся сеносоломопрессы, предназначенные для прессования сена и соломы в тюки для дальнейшего хранения, различного вида решетные сепараторы, разделяющие сыпучие материалы на фракции, вибростолы, очищающие сельскохозяйственные продукты, лесопильные рамы, применяемые для продольной распиловки древесины, поршневые компрессоры и насосы и некоторые другие механизмы.

Возвратно-поступательное движение рабочего органа механизмов приводит к появлению периодической пульсирующей нагрузки на валу электродвигателя, а изменение запаса кинетической энергии рабочего органа — к переменному моменту инерции механической части электропривода.

Сложность динамических процессов, протекающих в таких механических системах, требует использования специальных методов их расчета и выбора элементов электропривода.

Эти методы основаны на анализе квазиустановившихся режимов работы электроприводов при переменной периодической нагрузке. Они позволяют, в конечном итоге, определить нагрузочную диаграмму двигателя и правиль-

но его выбрать. Исходными для анализа электроприводов являются функциональные зависимости момента сопротивления и момента инерции механической части электропривода, относящиеся к основным приводным характеристикам этих механизмов.

13.2. ПРИВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С КРИВОШИПНО-ШАТУННЫМ МЕХАНИЗМОМ

Нагрузочная характеристика — это зависимость момента сопротивления механизма от угла поворота вала или времени $M_c = f(\varphi)$, или $M_c = f(t)$. Ее получают, используя схему сил, действующих в устройстве (рис. 13.1). Для определения сопротивления на валу кривошипа необходимо найти касательную составляющую T по известной силе F , действующей на рабочий орган. Из схемы действия сил

$$F_{\text{ш}} = \frac{F}{\cos\beta}, \quad (13.1)$$

$$T = F \sin(\varphi + \beta) = F \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta}.$$

Следовательно, момент сопротивления механизма, приведенный к валу электродвигателя, с учетом трения во вращающихся частях

$$M_c = M_{c0} + \frac{F \cdot r \cdot \sin(\varphi + \beta)}{i \cdot \cos\beta}, \quad (13.2)$$

где M_{c0} — момент сил трения; i — передаточное число от вала двигателя к валу кривошипа; r — радиус кривошипа; l — длина шатуна.

При соотношении $r < 5l$ (рис. 13.1), что характерно для большинства электроприводов, выражение (13.2) может быть упрощено

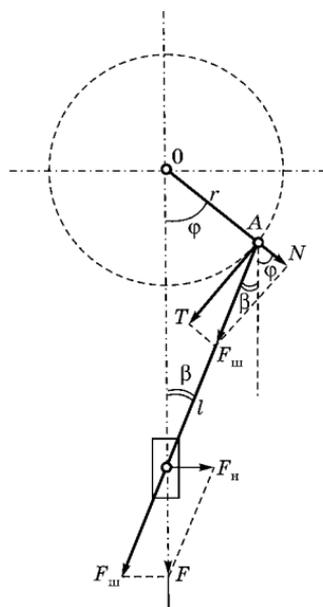


Рис. 13.1
Схема действия сил
в кривошипно-шатунном
устройстве

$$M_c = M_{c0} + \frac{F \cdot r}{i} \sin \varphi. \quad (13.3)$$

Если учесть, что угол $\varphi \equiv \omega_{cp} \cdot t$, то (13.3) может быть записано в функции времени, где ω_{cp} — средняя угловая скорость кривошипа

$$M_c = M_{c0} + \frac{F \cdot r}{i} \sin \omega t. \quad (13.4)$$

Закон изменения момента по (13.4) определяется характером силы F , действующей на рабочий орган механизма, и зависимостью от перемещения (см. рис. 13.1). Эта сила может иметь потенциальный характер, т. е. определяться накопленной потенциальной энергией или реактивной, обусловленной рассеянием энергии при движении рабочего органа.

Потенциальный характер носит сила, обусловленная давлением сжатого газа в цилиндре поршневого компрессора, сила упругой деформации прессуемой массы в рабочей камере сеносоломопресса или сила тяжести вертикальной пильной рамы. К реактивным силам относятся силы трения, смятия и другие, связанные с рассеянием энергии. Эти силы присутствуют во всех рассматриваемых механизмах. Отличительной особенностью реактивных сил является изменение направления их действия при изменении направления движения. Они всегда препятствуют движению. Как правило, в сельскохозяйственных механизмах с кривошипно-шатунным устройством присутствуют силы и потенциального и реактивного характера, причем потенциальные силы могут действовать на части периода вращения вала кривошипа, если они связаны с упругими деформациями, например в компрессорах или сеносоломопрессах. Эти обстоятельства осложняют математическое описание нагрузочных характеристик. Если сила $F = \text{const}$, то нагрузочная диаграмма механизма полностью соответствует уравнению (13.4) (рис. 13.2).

В действительности $F \neq \text{const}$, нагрузочная характеристика имеет более сложный вид. На рис. 13.3 приведены схема устройства компрессора, нагнетающего газ в ресивер, и его нагрузочная характеристика. В процессе движения поршня вверх (угол $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$) при закрытых

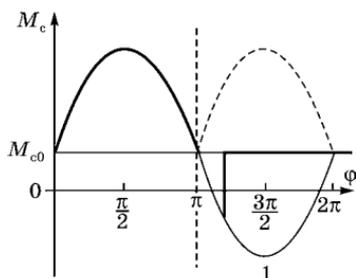


Рис. 13.2
Нагрузочная характеристика кривошипно-шатунного механизма при $F = \text{const}$

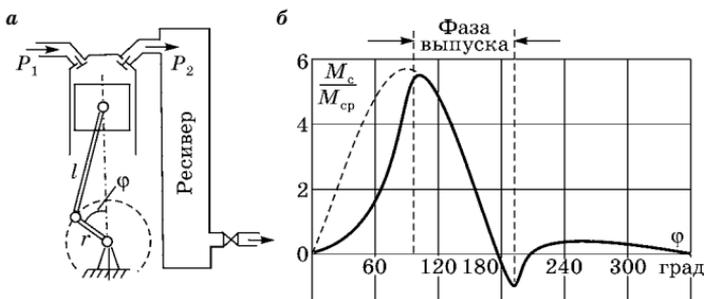


Рис. 13.3
Схемы устройства (а) и нагрузочная характеристика (б) поршневого одноцилиндрового компрессора

клапанах происходит сжатие газа, повышение давления в рабочей камере, сила (потенциальная) и момент сначала возрастают (рис. 13.3б). При выравнивании давления газа в камере и ресивере открывается выпускной клапан и газ начинает нагнетаться в ресивер (начало при $\varphi \approx 90^\circ$). В течение всей фазы выпуска ($90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$) момент сопротивления изменяется по синусоиде. С прохождением верхней мертвой точки ($\varphi = 180^\circ$) выпускной клапан закрывается, давление в камере падает, открывается впускной клапан и газ заполняет цилиндр. На полупериоде всасывания ($180^\circ < \alpha < 360^\circ$) действуют в основном реактивные силы, амплитуда их мала.

На рис. 13.4 представлены кинематическая схема и нагрузочная характеристика сеносоломопресса в относительных единицах. Движение рабочего органа вправо приводит к сжатию прессуемой массы сена или соломы. Сначала уплотнение происходит за счет сокращения воздушных промежутков, здесь момент сопротивления мал и остается

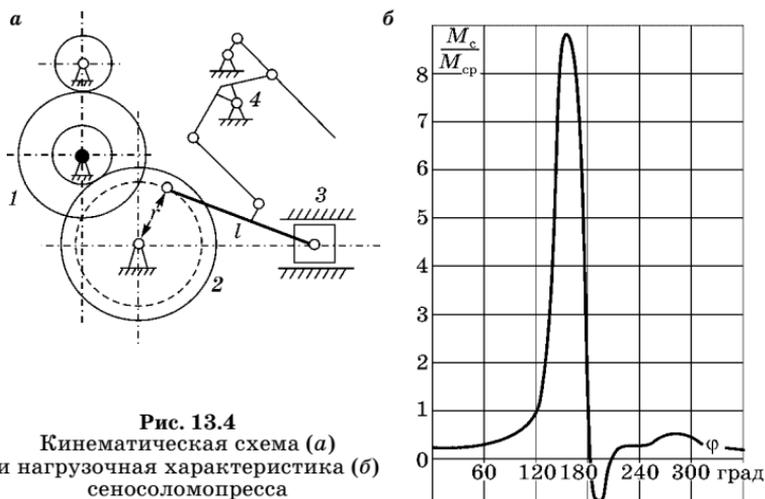


Рис. 13.4
Кинематическая схема (а)
и нагрузочная характеристика (б)
сеносоломопресса

практически постоянным. Затем деформируется сам материал, момент резко возрастает. Пик момента достигается в правой мертвой точке. При движении поршня влево имеет место небольшой отрицательный выброс момента, вызванный потенциальной силой упругой деформации массы.

В качестве базисной величины на рис. 13.3, 13.4 выбран средний момент сопротивления M_{cp} за один оборот кривошипа.

Приведенные характеристики являются типичными для большинства сельскохозяйственных машин с кривошипно-шатунным механизмом. Для них характерны: периодичность с постоянным периодом; высокая неравномерность момента сопротивления; практически постоянное за время работы значение среднего момента; режим работы чаще S1.

Инерционная характеристика. В механизмах, преобразующих вращательное движение в возвратно-поступательное при помощи кривошипно-шатунного устройства, скорость и ускорение движущихся масс и шатуна изменяются по значению и знаку за один оборот. Соответственно изменяются запас кинетической энергии и приведенный момент инерции.

Кинетическая энергия механизма (без учета момента инерции шатуна):

$$W_k = W_B + W_{II}, \quad (13.5)$$

где W_B — запас кинетической энергии звеньев, связанных с валом кривошипа и вращающихся вокруг неподвижной оси; W_{II} — запас кинетической энергии поступательно движущихся звеньев.

На основе баланса кинетической энергии

$$W_K = J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} = J_B \frac{\omega^2}{2} + J_{II} \frac{v^2}{2}, \quad (13.6)$$

где J_{Σ} — суммарный приведенный к валу двигателя или кривошипа момент инерции; ω — угловая скорость вала; J_B, J_{II} — приведенный момент инерции вращающихся и поступательно движущихся звеньев, связанных с валом кривошипа; m — масса поступательно движущихся частей; v — скорость поступательного движения. При этом

$$J_{\Sigma} = J_B + m \frac{v^2}{\omega^2} = J_B + J_{II}. \quad (13.7)$$

Учитывая соотношение (см. рис. 13.1)

$$v = \omega r \frac{\sin^2(\varphi + \beta)}{\cos \beta},$$

получим

$$J_{II} = m r^2 \frac{\sin^2(\varphi + \beta)}{\cos^2 \beta}. \quad (13.8)$$

На практике чаще $l \geq 5r$, поэтому

$$J_{II} = m r^2 \sin^2 \varphi. \quad (13.9)$$

На рис. 13.5 представлена зависимость приведенного момента инерции механизма от угла поворота вала кривошипа по (13.9), $J = J_{\max}$ при

$$\varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{4\pi}{3}, \dots,$$

и J_{\min} — в мертвых точках, при $\varphi = 0, \pi, 2\pi, \dots$

На рис. 13.5 J_{Σ} — суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции; J_0 — приведенный момент инерции звеньев, связанных с валом кривошипа.

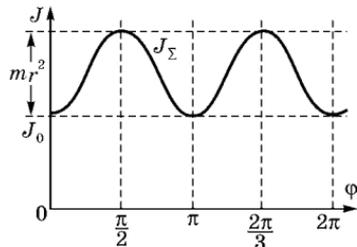


Рис. 13.5
Инерционная характеристика

13.3. ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ МАХОВИКОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В качестве двигателя в рассматриваемых механизмах используются в основном асинхронные короткозамкнутые машины. Регулирование скорости в большинстве случаев не требуется, механические характеристики соответствуют рабочему и пусковому режимам механизма. Однако высокая неравномерность нагрузочных характеристик требует дополнительных мер по их выравниванию, так как перегрузочная способность двигателя по моменту $K_M = (2 \div 3)$.

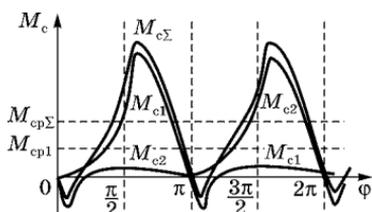


Рис. 13.6

Нагрузочная характеристика двухцилиндрового компрессора

Выравнивание нагрузки осуществляется двумя техническими приемами:

1. При наличии нескольких кривошипно-шатунных устройств их рабочий процесс разносится по фазам,

подобно многоцилиндровому двигателю внутреннего сгорания. На рис. 13.6 приведена нагрузочная диаграмма двухцилиндрового компрессора. Очевидно, что при большем числе цилиндров переменная составляющая момента относительно постоянной составляющей $M_{cp\Sigma}$ еще более уменьшается. На рис. 13.6 M_{c1} и M_{c2} — моменты от одного цилиндра при сжатии и всасывании;

2. Использование маховиков, когда преодоление пика нагрузки происходит за счет кинетической энергии маховика. На практике зачастую совмещаются оба приема.

Выбор силовых элементов электропривода должен базироваться на анализе механических и динамических процессов, что представляет собой весьма сложную задачу. В практических расчетах задачу упрощают, полагая, что $M_{cp} = \text{const}$, $J_v \gg J_n$, т. е. пренебрегают переменной составляющей момента инерции при наличии маховика. Следовательно, для выбора двигателя необходима его нагрузочная характеристика $M = f(t)$.

Исходными данными для исследования физических процессов нагружения механизмов с кривошипно-шатунными

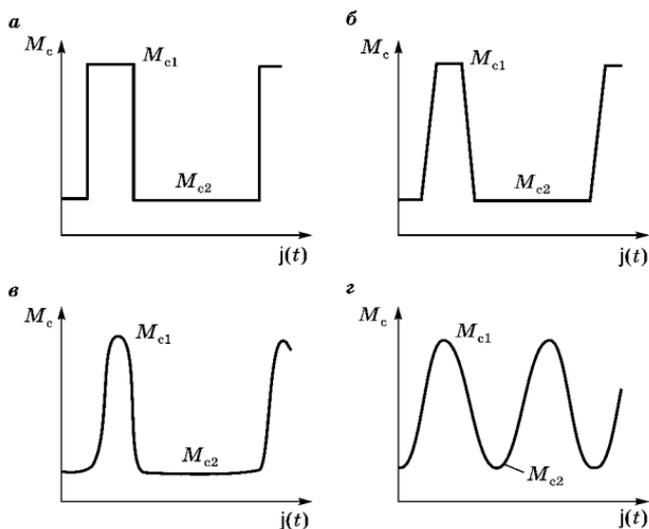


Рис. 13.7

Эквивалентные нагрузочные характеристики:

a — прямоугольная; *б* — трапецидально-прямоугольная; *в* — косинусоидально-прямоугольная; *г* — синусоидальная.

устройствами являются нагрузочные и инерционные характеристики (см. рис. 13.4–13.6). Точное математическое описание нагрузочных характеристик механизмов трудно поддается описанию, поэтому в инженерной практике используются эквивалентные нагрузочные характеристики (рис. 13.7): прямоугольная (рис. 13.7*a*), трапецидальная (рис. 13.7*б*), косинусоидально-прямоугольная (рис. 13.7*в*) и синусоидальная (рис. 13.7*г*). Первые три характеристики применяются при анализе механизмов с одним устройством, четвертая — с несколькими кривошипно-шатунными устройствами при фазовом разнесении процессов.

Эквивалентность характеристик реальной нагрузочной диаграмме по энергетике достигается равенством энергий (или площадей, ограниченных графиками), передаваемых двигателем механизму.

С эквивалентностью по динамике дело обстоит сложнее, здесь наилучшее приближение будет при равенстве периодов диаграмм ($T_p = T_g$), пиковых моментов M_{c1} и моментов холостого хода M_{c2} (см. рис. 13.6, 13.7).

Таким образом, условие эквивалентности может быть выражено соотношениями:

$$\begin{aligned} S_э = S_p; \quad T_p = T_э; \quad M_{c1э} = M_{c1p}; \\ M_{c2э} = M_{c2p}. \end{aligned} \quad (13.10)$$

При соблюдении этих требований будут равны значения средних моментов

$$M_{срэ} = M_{срп}. \quad (13.11)$$

При выборе электродвигателя по мощности и расчете момента инерции маховика следует стремиться к полному использованию двигателя по условиям нагрева, что приводит к минимальным размерам маховика.

13.3.1. НАГРУЗОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Реальную нагрузочную диаграмму (рис. 13.8а) заменим эквивалентной прямоугольной (рис. 13.8б), соблюдая условия по (13.10). При математическом описании процесса нагружения приняты допущения:

1) электромагнитными переходными процессами, как более быстрыми по сравнению с механическими, пренебрегают;

2) рабочий участок механической характеристики двигателя между точками ω_0 и ω_n считается линейным;

3) момент сопротивления механизма не зависит от скорости, вследствие малости изменения $\Delta\omega$;

4) момент инерции привода $J_\Sigma = \text{const}$.

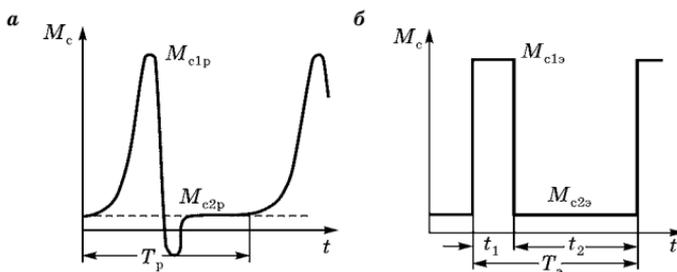


Рис. 13.8

Реальная (а) и эквивалентная прямоугольная (б) нагрузочные характеристики

Режим нагружения при этих допущениях описывается следующими уравнениями [2, 3, 4, 45, 51]

$$\left. \begin{aligned} M - M_c &= J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} \\ M &= \beta(\omega_0 - \omega) \\ M_c &= M_{c1}, \text{ при } 0 < t < t_1 \\ M_c &= M_{c2}, \text{ при } t_1 < t < t_2 \end{aligned} \right\}, \quad (13.12)$$

где M — момент двигателя; ω — угловая скорость двигателя; β — коэффициент жесткости линейного участка механической характеристики $\beta = \frac{M_H}{\omega_0 \cdot s_H}$.

Решая систему (13.12) относительно момента, получим уравнения

$$\begin{aligned} T_M \frac{dM}{dt} + M &= M_{c1}, \quad 0 < t < t_1; \\ T_M \frac{dM}{dt} + M &= M_{c2}, \quad t_1 < t < t_2, \end{aligned} \quad (13.13)$$

где $T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta}$ — механическая постоянная времени электропривода.

Решение (13.13) имеет вид

$$M(t) = (M_{\text{нач}} - M_y) e^{-\frac{t}{T_M}} + M_y, \quad (13.14)$$

где $M_{\text{нач}}$ и M_y — начальное и установившееся значение момента двигателя.

На рис. 13.9 представлена прямоугольная нагрузочная характеристика механизма и расчетная M_T характеристика двигателя, которая оказалась достаточно выровненной. Очевидно, что степень выравнивания зависит от соотношения интервалов времени t_1 и t_2 . При этом пики момента

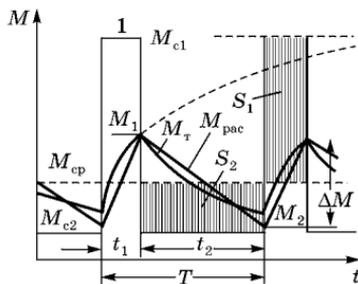


Рис. 13.9
Прямоугольная эквивалентная нагрузочная характеристика механизма (1) и теоретическая M_T электродвигателя

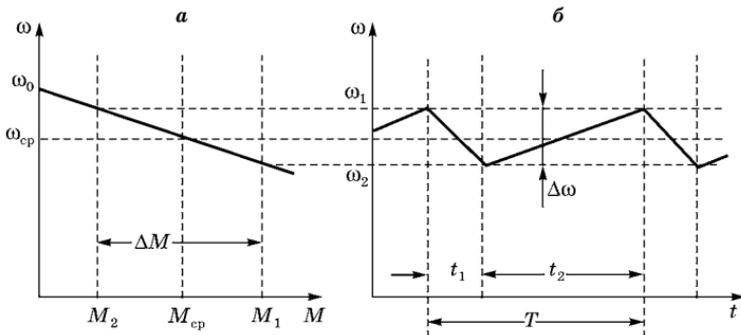


Рис. 13.10

Линеаризованная механическая характеристика двигателя (а) и диаграмма изменения скорости (б)

нагрузки (время t_1) покрываются за счет накопленной кинетической энергии маховика, которая восстанавливается в интервале ускорения t_2 .

При $T_m \gg t_1$, $T_m \gg t_2$ экспоненциальные участки характеристики M_T без серьезной ошибки можно заменить наклонными прямыми (M_{pac}) и, таким образом, перейти к трапецеидальной форме нагрузочной характеристики. При этом связь между средним, пиковым и минимальным моментами будет

$$M_{cp} = \frac{M_1 + M_2}{2}. \quad (13.15)$$

На рис. 13.10 приведены линеаризованная механическая характеристика и диаграмма изменения скорости.

13.3.2. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ

Электродвигатель выбирается, как правило, методом эквивалентного момента для режима S1 по полученной нагрузочной характеристике электродвигателя $M(t)$.

Необходимое условие — $M_n \geq M_э$.

Эквивалентный момент для трапецеидальной нагрузочной характеристики будет [34]

$$M = \frac{1}{3} \sqrt{M_1^2 + M_1 M_2 + M_2^2}. \quad (13.16)$$

Таким образом, необходимо знать значения пикового и минимального моментов электродвигателя. Пиковый

момент M_1 выбирается по допустимой перегрузке двигателя с учетом возможного снижения напряжения питания (K_u) и колебаний пиковой нагрузки самого механизма (K_M).

$$M_1 = M_H \cdot \lambda_{\text{доп}} = M_H \cdot \mu_K \frac{K_u}{K_M}, \quad (13.17)$$

где μ_K — каталожная кратность максимального момента,

$$\mu_K = \frac{M_m}{M_H}.$$

Минимальный момент определяется из (13.15)

$$M_2 = 2M_{\text{ср}} - M_1 = \frac{2S_p \mu_M}{T_p} - M_1, \quad (13.18)$$

где S_p — площадь, ограниченная реальной нагрузочной характеристикой, мм²; μ_M — масштаб момента, Н·м/мм; μ_1 — масштаб времени, с/мм; $T_p = t_1 + t_2$ — время цикла (см. рис. 13.8, 13.9).

Для определения пикового момента M_1 по (13.17) необходимо значение номинального момента электродвигателя, что является конечной целью расчета. Поэтому сначала следует выбрать двигатель по соотношению

$$M_H = K_3 \cdot M_{\text{ср}} = \frac{K_3 \cdot S_p \cdot \mu_M \mu_1}{T_p}, \quad (13.19)$$

где K_3 — коэффициент запаса $K_3 = 1,1 \div 1,3$.

Дальнейшее определение эквивалентного момента проводится с целью проверки правильности предварительного выбора электродвигателя.

13.3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАХОВИКА

Расчет необходимого момента инерции маховика целесообразно вести с энергетической точки зрения. За время t_1 (см. рис. 13.8–13.9) маховые массы электропривода должны отдать некоторое количество запасенной кинетической энергии по преодолению пика нагрузки. Она определяется разностью запасов кинетической энергии привода при максимальной ω_1 и минимальной ω_2 скоростях

$$W_K = J_\Sigma \frac{\omega_1^2}{2} - J_\Sigma \frac{\omega_2^2}{2} = J_\Sigma \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} (\omega_1 - \omega_2) = J_\Sigma \omega_{\text{ср}} \Delta\omega. \quad (13.20)$$

Работа, совершаемая за счет энергии W_k , может быть определена через площадь пика нагрузки, расположенную над кривой нагрузки двигателя. Эта площадь равна S_1 на рис. 13.9, т. е.

$$W_k = S_1 \cdot \omega_{cp} = (M_{c1} - M_{c2})t_1 \cdot \omega_{cp}. \quad (13.21)$$

Приравнявая 13.20 и 13.21 и решая полученное равенство относительно суммарного момента инерции привода, получим

$$J_{\Sigma} = \frac{(M_{c1} - M_{c2})t_1}{\Delta\omega}. \quad (13.22)$$

Аналогичным образом суммарный момент инерции может быть определен через площадку S_2 (см. рис. 13.9), пропорциональную энергии, которую электродвигатель передает маховым массам, разгоняя их после рабочего периода в течение времени t_2 .

$$J_{\Sigma} = \frac{(M_{c1} - M_{c2})t_2}{\Delta\omega}. \quad (13.23)$$

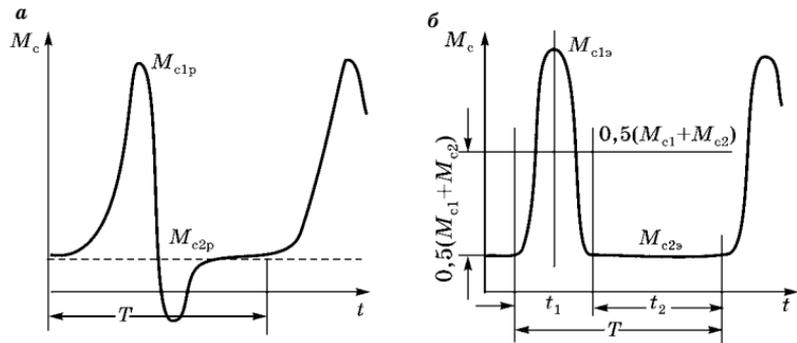


Рис. 13.11
Реальная (а) и эквивалентная косинусоидально-прямоугольно-нагрузочные характеристики

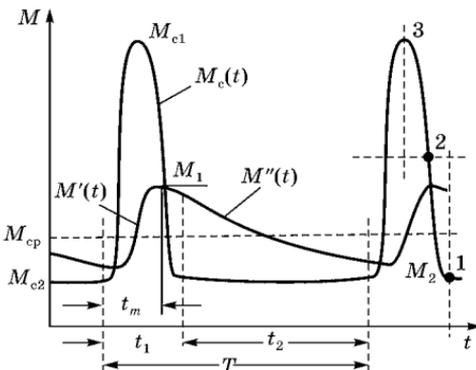


Рис. 13.12
Нагрузочные характеристики механизма $M_c(t)$ и электродвигателя $M'(t)$

Перепад угловой скорости $\Delta\omega$ находится с помощью коэффициента жесткости рабочего участка механической характеристики выбранного электродвигателя (рис. 13.10)

$$\Delta\omega = \frac{\Delta M}{\beta} = \frac{M_1 - M_2}{M_H} \omega_0 \cdot s_H. \quad (13.24)$$

Момент инерции маховика определяется как разность между суммарным моментом инерции привода J_Σ и моментом инерции двигателя J_d и средним приведенным моментом инерции механизма $J_{\text{мех ср}}$.

$$J_m = J_\Sigma - J_d - J_{\text{мех ср}}. \quad (13.25)$$

Расчет заканчивается определением геометрических размеров маховика с учетом приведения момента инерции J_m к валу, на который навешивается маховик.

Более точные результаты получаются при использовании косинусоидально-прямоугольных нагрузочных характеристик в качестве эквивалентных (метод проф. Г. И. Назарова) [51]. Сказанное подтверждают изображенные на рис. 13.11, 13.12 нагрузочные диаграммы (реальная и эквивалентная) и расчетные — механизма и электродвигателя.

13.4. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПИЛОРАМ

Лесопильные рамы (см. рис. 13.13) предназначены для продольной распиловки бревен на доски и бруска длиной 2–8 метров.

Кинематическая схема лесопильной рамы в основе содержит кривошипно-шатунный механизм, преобразующий вращательное движение двигателя в возвратно-поступательное самой рамы. Рабочий ход рамы — движение вниз, обратный (возврат) — движение вверх.

Подача бревна осуществляется дискретно, в момент, когда рама находится в верхней мертвой точке. Пуск главного двигателя производится также при положении рамы «вверху», что облегчает пусковой режим. Для сглаживания пульсаций момента и скорости используются, как правило, маховики.

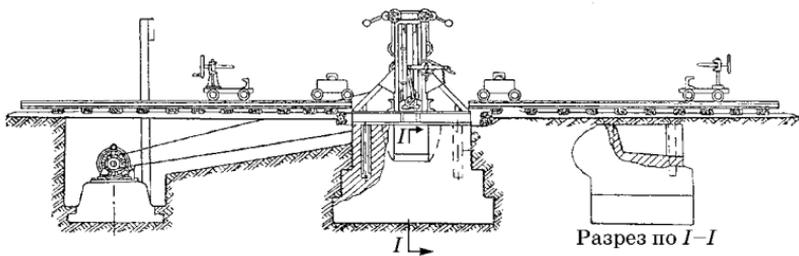


Рис. 13.13
Устройство пилорамы

Статический момент сопротивления пилорамы [45]

$$M_c = M_{cx} + M_{py}, \quad (13.26)$$

где M_{cx} — момент сопротивления холостого хода; M_{py} — момент сопротивления резанию материала.

Момент сопротивления холостого хода зависит от угла поворота кривошипного вала (см. рис. 13.1)

$$M_{cx} = M_{тр} - M_{x \max} \cdot \sin \varphi, \quad (13.27)$$

где $M_{тр}$ — средний момент сопротивления от сил трения; $M_{x \max} = g \cdot m_p \cdot r$ — максимальный момент сопротивления от веса рамы; r — радиус кривошипа; m_p — масса рамы; $\varphi = \omega \cdot t$; ω — угловая скорость кривошипа.

Момент сопротивления резанию при ходе пильной рамы сверху вниз зависит от угла поворота [45]

$$M_{py} = M_{py \max} \cdot \left(\sin \varphi + \frac{r}{2L} \sin 2\varphi \right). \quad (13.28)$$

Максимальный момент резания

$$M_{py \max} = \frac{k \cdot b \cdot \sum h \cdot \Delta \cdot r}{H}, \quad (13.29)$$

где b — ширина пропила, мм; $\sum h = 0,75 D_{cp} z$ — сумма высот пропилов посередине бревна, мм; D_{cp} — диаметр среднего сечения бревна, мм; z — число пил; Δ — подача, мм, $\Delta = 4 \div 16$ мм в зависимости от типа рамы и свойств материала (сосна, береза, дуб); k — удельное сопротивление пиленю зависит от породы дерева, подачи, $k = (100 \div 200)$ Н/мм² (сосна — 110, ель — 120, береза — 140, дуб — 200); $H = 2r$; L или l — длина шатуна (см. рис. 13.1);

$$M_{\text{срр}} = M_{\text{сх}} + \frac{1}{\pi} M_{\text{ру max}}, \quad (13.30)$$

где $M_{\text{срр}} \equiv 0,02 \cdot m \cdot r \cdot \omega_{\text{кр}}$; m — масса движущихся частей, кг.
Среднее значение мощности привода пилорамы, Вт

$$P_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{срр}} \cdot \omega_{\text{кр}}}{\eta_{\text{п}}}, \quad (13.31)$$

где $\eta_{\text{п}}$ — коэффициент полезного действия станка (передачи), $\eta_{\text{п}} = (0,7 \div 0,85)$.

В общем случае на нагрузочную диаграмму двигателя влияет переменный приведенный момент инерции, зависящий от угла поворота кривошипа [45, 51]

$$J = J_{\text{м}} + m_{\text{п}} \frac{v^2}{\omega_{\text{дв}}^2} = J_{\text{м}} + m_{\text{п}} \frac{r^2}{i^2} \left(\sin \omega_{\text{кр}} t + \frac{r}{2L} \sin 2\omega_{\text{кр}} t \right), \quad (13.32)$$

где $J_{\text{м}}$ — приведенный момент инерции машины и других частей с постоянным моментом инерции; v — скорость пильной рамы, м/с; $\omega_{\text{дв}}$ — угловая скорость вращения двигателя; $i = \frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\text{кр}}}$ — передаточное отношение.

Момент на валу двигателя определяется из уравнения движения электропривода

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{с}} + M_{\text{дин}} = M_{\text{с}} + J \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} + \frac{\omega_{\text{дв}}}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}. \quad (13.33)$$

Если составляющая $J \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} \gg \frac{\omega_{\text{дв}}}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}$, что возможно при наличии маховика, то уравнение (13.33) упрощается, и мощность электродвигателя

$$P_{\text{дв}} = k_{\text{з}} \cdot P_{\text{ср}}, \quad (13.34)$$

где $k_{\text{з}} = (1,05 \div 1,2)$ учитывает динамические нагрузки.

Пусковой момент двигателя должен удовлетворять условию: при пуске из верхней мертвой точки

$$\left(\frac{U}{U_{\text{н}}} \right)^2 M_{\text{п}} > 1,25 M_{\text{сх max}} = 1,25 (M_{\text{тр}} + g \cdot m_{\text{п}} \cdot R), \quad (13.35)$$

где U — значение напряжения на зажимах двигателя при пуске.

14 ЭЛЕКТРОПРИВОД МАШИН ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И РАЗДАЧИ КОРМОВ НА ФЕРМАХ. ВНУТРЕННИЙ ТРАНСПОРТ ТЕПЛИЧНЫХ ХОЗЯЙСТВ

14.1. КОРМОПРИГОТОВИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Кормоприготовление в сельскохозяйственном производстве относится к энергоемким технологическим процессам. Операция измельчения является основной в приготовлении комбикормов: измельчаются зерно, стебельные сочные и грубые корма, корнеклубнеплоды, пищевые корма, мясокостные корма на звероводческих фермах и др. Высокая энергоемкость кормоприготовления обусловлена необходимостью разрушения первоначальной структуры и образованием новых структур прессованием при производстве гранул или брикетов. Основными рабочими органами измельчающих машин являются вращающиеся молотки, вращающиеся ножи с противорезущим устройством и вращающиеся бичи, разрывающие материал и расщепляющие его вдоль волокон.

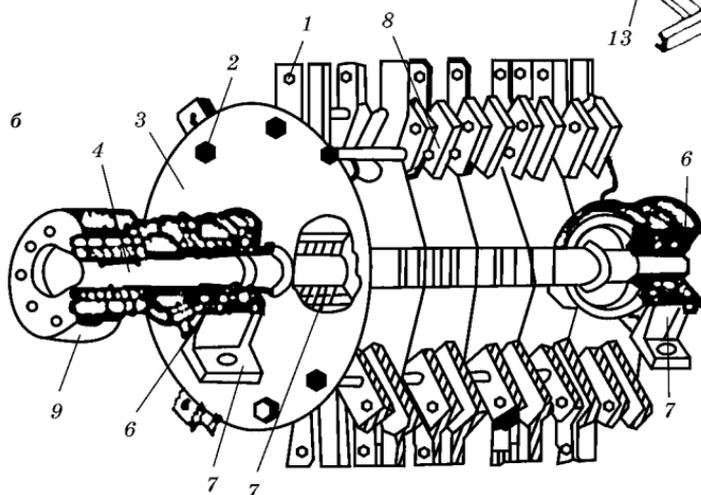
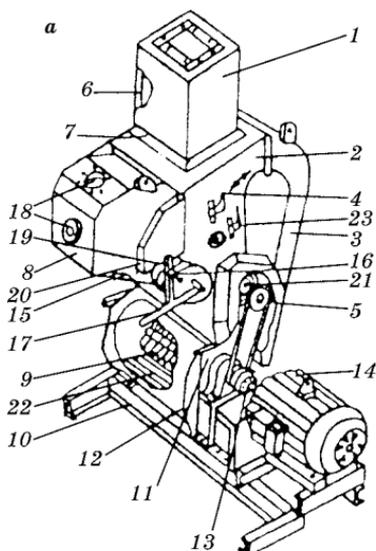
Привод кормоприготовительных машин в большинстве своем строится на базе короткозамкнутых асинхронных двигателей в диапазоне мощностей 20÷200 кВт. При таких мощностях эффективность использования электроэнергии во многом определяет стоимость конечного продукта. Следовательно, основными задачами при выборе электропривода являются:

- 1) соблюдение технологических требований для обеспечения требуемого качества продукции;
- 2) установление энергетического соответствия между технологическим процессом и режимами работы с целью минимизации энергоемкости продукции, что достигается оптимизацией конструкции рабочих органов и управлением режимами работы — подачей и скоростью вращения.

Рис. 14.1

Дробилка ДБ-5 (а), ротор (б):

а: 1 — фильтр; 2 — камера разделительная; 3 — кормопровод; 4 — рычаг управления заслонкой; 5 — клиноременная передача; 6 — скоба; 7 — рамка; 8 — бункер; 9 — ротор; 10 — рама; 11 — корпус; 12 — крышка откидная; 13 — втулочно-пальцевая муфта со шкивом; 14 — электродвигатель; 15 — магнитный сепаратор; 16 — зажим; 17 — рычаг; 18 — загрузочное и смотровое окно; 19 — электропривод заслонки бункера-дозатора; 20 — кожух; 21 — шкив привода шнека для выгрузки измельченного зерна; 22 — дека; 23 — рычаг управления удлиняющим козырьком; б: 1 — молоток; 2 — ось; 3 — диск; 4 — вал; 5 — втулка; 6 — двухрядный роликоподшипник; 7 — корпус; 8 — распорная втулка; 9 — муфта.



На рис. 14.1–14.6 приведены устройство и технологические схемы работы измельчителей кормов [45, 46, 48].

Универсальная молотковая дробилка кормов (рис. 14.1а, б) предназначена для измельчения различных видов фуражного зерна, грубых кормов и початков кукурузы в муку, измельчения зеленой массы, грубых и сочных кормов на сечку. В зависимости от перерабатываемого материала изменяются режим работы механизма загрузки и скорость вращения ротора.

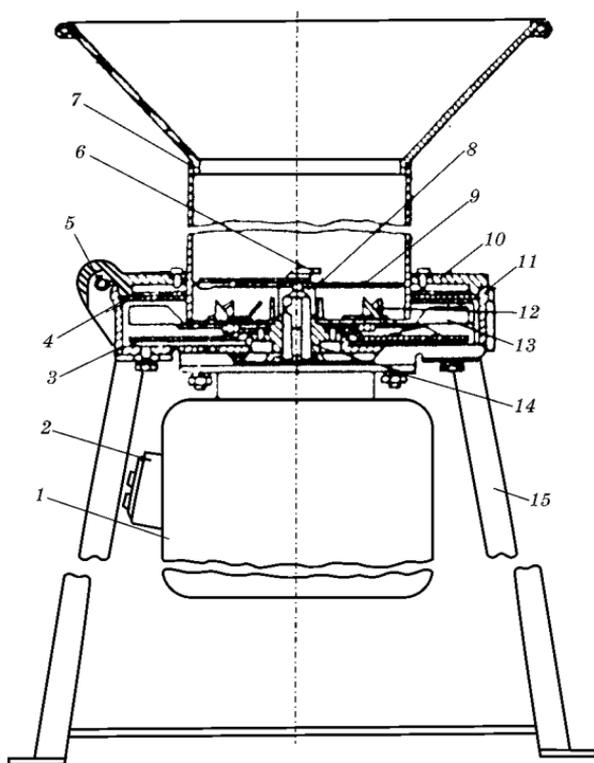


Рис. 14.2

Схема корнерезки КПИ-4:

1 — электродвигатель; 2 — магнитный пускатель; 3 — выбрасыватель; 4 — дека; 5 — палец шарнира; 6 — специальный болт; 7 — бункер; 8 — ступица верхнего диска; 9 — верхний диск с ножом; 10 — крышка камеры измельчения; 11 — корпус камеры измельчения; 12 — вертикальные ножи; 13 — лопасти нижнего диска; 14 — ступица выбрасывателя; 15 — станина.

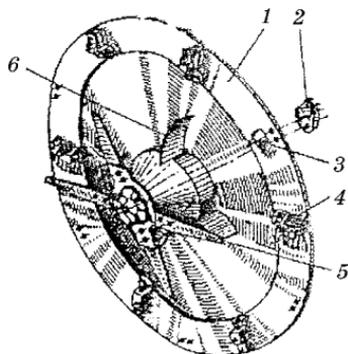


Рис. 14.3

Ротор измельчителя кормов
ИУ-Ф-10:

1 — диск; 2, 6 — лопатки; 3, 5 — ножи;
4 — молоток.

Рис. 14.4
 Схема технологического
 процесса измельчителя-
 камнеуловителя ИКМ-Ф-10

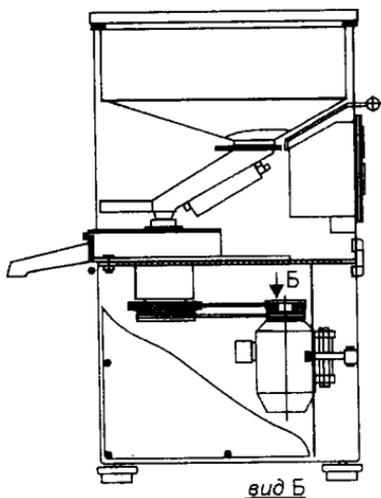
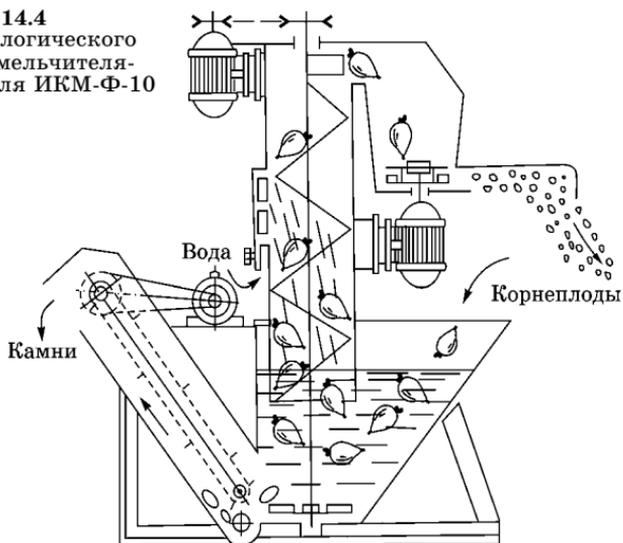


Рис. 14.5
 Измельчитель
 ИЛС.
 Общий вид

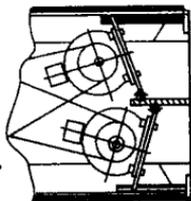


Рис. 14.6
 Современная молотковая дробилка
 «Вента». Общий вид

Основные характеристики дробилки:

- производительность машины — 3,5 т/ч (ячмень);
- диаметр молоткового ротора — 500 мм (см. рис. 14.1б);
- частота вращения — 2940 об/мин;
- мощность электродвигателя — 32,2 кВт.

Измельчители сочных кормов (рис. 14.2, 14.4) предназначены для измельчения корнеплодов, применяются на фермах КРС. На рис. 14.4 приведена схема измельчителя «Волгарь», предназначенного для измельчения корнеклубнеплодов, зеленой массы и силоса, сена, соломы. Мощность привода — 22 кВт, производительность — до 10 т/ч (корнеплоды). Степень измельчения регулируется установкой под определенным углом лезвия первого подвижного ножа.

На рис. 14.5 представлен общий вид измельчителя центробежно-роторного типа ИЛС-5 (модификации ИЛС-015, ИЛС-05), работающего по новой технологии (технические характеристики в табл. 14.1). Корма измельчаются посредством импульсного среза и скалывания, за счет чего обеспечивается зоотехнически оптимальный помол с содержанием пылевидной фракции не более 5%.

На рис. 14.6 приведен общий вид современной промышленной дробилки «Вента», используемой на комбикормовых заводах. Они поставляются в комплекте с электроприводом и схемой управления, оборудованы устройством плавного пуска (УПП). Основные характеристики:

- производительность по пшенице — 9÷18 т/ч;
- потребляемая мощность (асинхронный привод) — 75, 90, 110, 132 кВт;
- частота вращения — 1500 об/мин;
- удельный расход энергии — 9÷7,5 кВт·ч/т.

Таблица 14.1

Технические характеристики измельчителей ИЛС

Показатели	ИЛС-015	ИЛС-05	ИЛС-5
Производительность, т/ч	0,1÷0,2	0,3÷0,5	2÷5
Влажность измельчаемого материала, %	До 20	До 20	До 20
Установленная мощность, кВт	0,8	4,4	30
Крупность помола на зерне, мм	0,2÷2,6	0,2÷2,6	0,2÷2,6
Удельный расход энергии, кВт·ч/т	8,0÷4,0	14,5÷9	15÷6

14.2. ПРИВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Работа рассматриваемых машин характеризуется затратами энергии непосредственно на процесс измельчения и преодоление сопротивления холостого хода.

Для измельчающих машин момент сопротивления может быть представлен в виде

$$M_c = M_p + M_x, \quad (14.1)$$

где M_p и M_x — моменты рабочего процесса и холостого хода.

Момент рабочего процесса представляет собой сложную нелинейную зависимость, определяемую конструкцией, техническим состоянием машины, свойствами материала, степенью измельчения, подачей и скоростью вращения. Аналитическое определение момента рабочего процесса весьма сложно, поэтому практически это происходит через удельный расход энергии, получаемый экспериментальным путем.

$$M_p = \frac{W_{уд} \cdot Q}{\omega}, \quad (14.2)$$

где $W_{уд}$ — расход энергии на единицу массы готовой продукции, Дж/кг; Q — подача материала, кг/с; ω — угловая скорость c^{-1} .

Отметим, что величина $W_{уд}$, полученная экспериментально, характеризует не только физические свойства материала, но и технологию, конструкцию рабочих органов. Получить ее расчетом практически невозможно, поэтому используются опытные данные, полученные для различных материалов и режимов работы при эксплуатации существующих машин. Очевидно, что изменение технологии, оптимизация конструкции машин позволят снизить величину $W_{уд}$ и, таким образом, повысить эффективность использования электроэнергии.

Момент холостого хода зависит в основном от скорости вращения рабочих органов, $M_x = f(\omega)$. В целом, он составляет 15÷25% полного момента сопротивления [5, 45].

Механические характеристики измельчающих механизмов представлены на рис. 14.7 при различных значениях подачи.

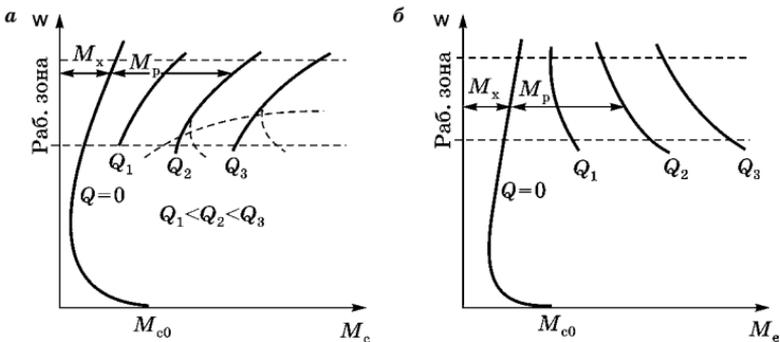


Рис. 14.7

Механические характеристики измельчающих механизмов (а) и механизмов для гранулирования и брикетирования кормов (б) при различных значениях подачи

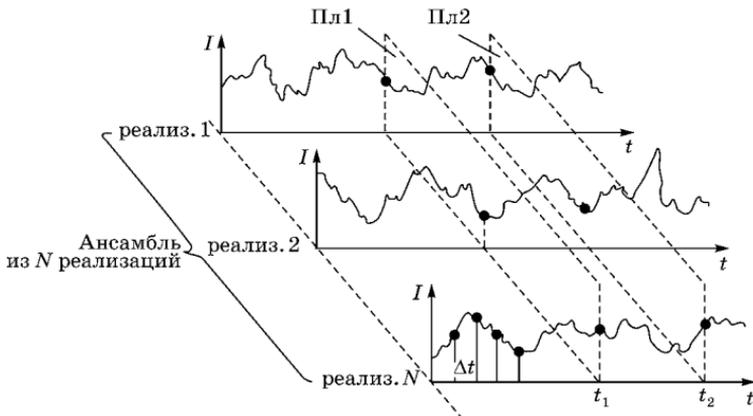


Рис. 14.8

Подборка из N реализаций случайного процесса нагружения электродвигателя (зависимость тока от времени)

Пуск энергоемких машин осуществляется вхолостую, поэтому условия трогания механизмов обусловлены моментом M_{c0} на механической характеристике холостого хода, который, как правило, не превышает номинального момента при нагрузке. При значительных моментах инерции используется устройство плавного пуска (УПП).

Нагрузочные характеристики кормоприготовительных машин представляют собой случайные функции времени. Причина этого — случайный характер подачи и изменения физико-механических свойств материала. Харак-

теристика случайного процесса будет определенной, если имеется достаточное количество его реализаций, например опытным путем (рис. 14.8). Используя математический аппарат теории вероятности, можно получить статистическую упорядоченную нагрузочную диаграмму, которая является вероятностной величиной.

Энергетические характеристики кормоприготовительных машин оцениваются удельным расходом энергии на единицу массы готовой продукции $W_{уд}$ или энергоемкостью. На рис. 14.9а, б, в представлена качественная картина изменения удельного расхода энергии молотковых дробилок от подачи для различных материалов, степени измельчения и влажности при $\omega = \text{const}$. Видно, что зависимости имеют явно выраженный экстремальный характер, поэтому подача при $W_{уд} \rightarrow \min$ может считаться оптимальной, $Q_{\text{опт}}$. Характерно, что подача $Q_{\text{опт}}$ близка к предельной по пропускной способности машины.

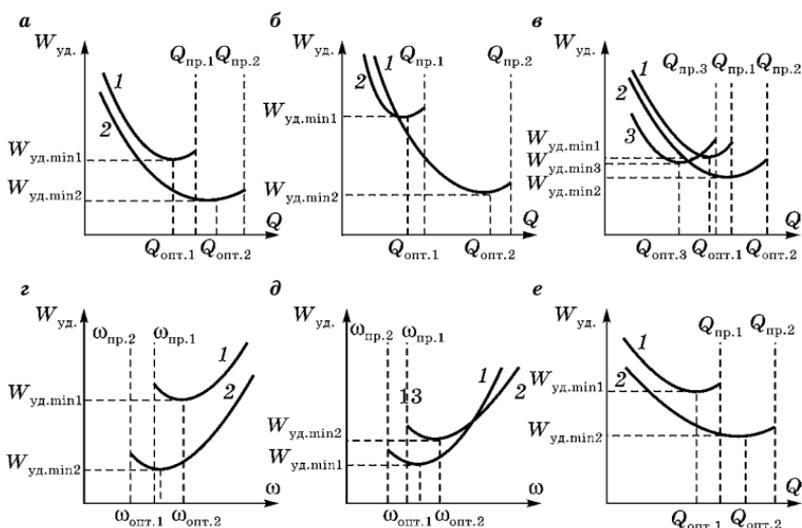


Рис. 14.9

Энергетические характеристики молотковых дробилок (а-д) и грануляторов (е):

а — $W_{уд}(Q)$ при измельчении прочного продукта (1) и менее прочного продукта (2); б — $W_{уд}(Q)$ при изменении степени измельчения $\lambda_1 < \lambda_2$; в — $W_{уд}(Q)$ при различных влажностях $x_1 < x_2 < x_3$; г — $W_{уд}(Q)$ при различных значениях прочности материала; д — $W_{уд}(Q)$ при $\lambda_1 < \lambda_2$; е — $W_{уд}(Q)$ при изменениях вида прессуемого продукта.

На рис. 14.9г, δ показано изменение удельного расхода энергии от скорости рабочих органов при постоянной подаче. Здесь также имеет место экстремум $W_{\text{уд min}}$. Следовательно, при изменении вида перерабатываемого материала или степени измельчения рационально изменять скорость вращения рабочих органов. Зависимости на рис. 14.9 имеют четкое физическое объяснение: при малых подачах увеличение $W_{\text{уд}}$ связано со снижением доли полезной энергии в общем энергетическом балансе. Необходимый диапазон изменения подачи и скорости, обеспечивающий $W_{\text{уд min}}$, составляет $(2 \div 5):1$ по подаче и $(1,5 \div 2):1$ по скорости. Очевидным представляется использование регулируемых электроприводов в обоих механизмах.

Таким образом, энергетическая оптимизация технологического процесса кормоприготовительных машин приводит к необходимости управления подачей и скоростью рабочих органов. Общая формула полезной расчетной мощности механизма

$$P = W_{\text{уд}} \cdot Q. \quad (14.3)$$

14.3. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ КОРМОПРИГОТОВИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

Электродвигатель привода рабочих органов машин должен обладать достаточно жесткими механическими характеристиками, значительной перегрузочной способностью (до трех и более), хорошими пусковыми свойствами, возможностью экономичного регулирования скорости с диапазоном $D \approx 2 \div 3$.

Указанным требованиям в наибольшей степени отвечает автоматизированный частотно-регулируемый асинхронный электропривод (см. главу 4), работающий в режиме стабилизации скорости. При этом решаются вопросы пуска, перегрузочной способности и плавного регулирования скорости. Следовательно, можно задавать оптимальное значение скорости, обеспечивающее минимум энергопотребления при определенных подаче, степени измельчения и вида продукта.

В существующих установках на комбикормовых заводах используются как нерегулируемый асинхронный электропривод, так и регулируемый по системе ПЧ–АД. В нерегулируемых приводах для снижения пусковых токов применяются устройства плавного пуска (УПП) или переключение обмоток двигателя «звезда — треугольник». В таких системах при $\omega = \text{const}$ оптимизация по $W_{\text{уд min}}$ возможна лишь в функции загрузки, степени измельчения и вида продукта (см. рис. 14.9).

В приводах по схеме ПЧ–АД, построенных по замкнутой системе [10, 11], допустима оптимизация по трем параметрам. На практике при переработке различных продуктов в зависимости от степени измельчения привод настраивается на определенную скорость (частоту), подачу и работает в режиме S1. Значения устанавливаемых скорости и подачи базируются, как правило, на опытных данных.

14.4. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ

Для кормоприготовительных машин мощность электродвигателя выбирается по наиболее энергоемкому процессу переработки продукта при номинальной подаче. Следовательно, для продолжительного режима, свойственного большинству машин, должно быть выполнено одно из условий (см. главу 7):

$$\begin{aligned} M_{\text{н}} &\geq M_{\text{экв}}; \\ P_{\text{н}} &\geq P_{\text{экв}}; \\ I_{\text{н}} &\geq I_{\text{экв}}. \end{aligned} \quad (14.4)$$

Эквивалентные величины момента, мощности и тока определяются по диаграммам нагрузки двигателя. Случайный процесс нагружения электроприводов рассматриваемых машин вносит свои коррективы при выборе электродвигателя. На практике зачастую пользуются средними величинами при определении удельной энергии $W_{\text{уд}}$, полученными опытным путем при испытании различных типов машин. Так, например, для дробилок корнеплодов

получено $W_{уд} = 3,5 \div 4 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, зерна $W_{уд} = 10 \div 40 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, в зависимости от размеров частиц.

Электропривод дробилок. Мощность электродвигателя, кВт [5, 48]

$$P = \frac{K_1 \cdot W_{уд} \cdot Q}{\eta_{п}}, \quad (14.5)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий потери холостого хода, $K_1 = 1,15 \div 1,3$; $W_{уд}$ — удельная энергия измельчения, для корнеплодов $W_{уд} = 3,5 \div 4 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, зерна $W_{уд} = 10 \div 18 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, при измельчении в муку $W_{уд} = 30 \div 40 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$; Q — производительность, т/ч; $\eta_{п}$ — КПД передачи.

Удельная энергия, кроме указанных выше значений, может быть рассчитана по формуле

$$W_{уд} = K_2 \cdot K_3 [K_4 \lg \lambda^3 + K_5 (\lambda - 1)], \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}, \quad (14.6)$$

где K_2 — коэффициент, учитывающий влияние влажности продукта по отношению к исходной при 14% [$K_2 = 1 + K_6(B - 14)$]; $K_6 = 0,06 \div 0,075$; B — относительная влажность зерна, %; λ — степень измельчения зерна: $\lambda = \frac{D_э}{d}$; $D_э$, d — средний размер (диаметр) частиц исходного и измельченного продукта; значения коэффициентов — в табл. 14.2.

Таблица 14.2

Значения коэффициентов

Культура	$D_э$, мм	K_3	K_4 , $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$	K_5 , $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$
Ячмень	4,2	1,2±0,3	2,4	2,06
Овес	3,7	5,0±1,5	0,04	0,54
Рожь	3,3	1,45±0,35	2,4	1,75

Измельчители кормов. Мощность электродвигателя, кВт

$$P = K_{xx} \cdot W_{уд} \cdot \frac{Q}{\eta_{п}}, \quad (14.7)$$

где $K_{xx} = 1,15 \div 1,2$ — коэффициент, учитывающий потери холостого хода; $W_{уд}$ — удельная энергия измельчения (на основании опытных данных для сочных кормов, соломы, сена $W_{уд} = 1,7 \div 8 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, корнеплодов $W_{уд} = 1,2 \div 1,3 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$); Q — производительность, т/ч; $\eta_{п}$ — КПД передачи.

Электропривод соломосилосорезок. Мощность электродвигателя

$$P = \frac{(P_{рез} + P_{под} + P_{xx})}{\eta_{п}} \cong \frac{5}{3} \cdot \frac{P_{рез}}{\eta_{п}}, \quad (14.8)$$

где $P_{рез}$ — мощность, расходуемая на резание корма; $P_{под}$ — мощность привода механизма подачи; P_{xx} — мощность холостого хода машины; $\eta_{п}$ — КПД передачи.

Мощность резания определяется силой F и скоростью v

$$P_{рез} = F \cdot v \approx k \cdot a \cdot b \cdot Z \cdot n, \text{ Вт}, \quad (14.9)$$

где k — число ножей; a и b — высота и ширина горловины, м; Z — удельное давление резания материала, $Z = 3500 \div 5000$ Па; n — частота вращения ножей, об/с.

Привод корнеклубнерезки. Мощность электродвигателя, кВт

$$P = \frac{K_{xx} \cdot W_{уд} \cdot Q}{\eta_{п}}, \quad (14.10)$$

где $K_{xx} = 1,15 \div 1,2$ — коэффициент, учитывающий потери холостого хода; $W_{уд}$ — удельная энергия дробления, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$ (на основании экспериментальных данных $W_{уд} = 0,65 \div 1 W_{уд} = 0,65 \div 1 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$); Q — производительность, т/ч; $\eta_{п}$ — КПД передачи.

В выражениях (14.5–14.10) для мощности электродвигателей величина $W_{уд}$ изменяется в широких пределах [5, 45, 46, 48]. При решении конкретных задач следует ориентироваться на результаты эксплуатации машины с учетом технологии и типа привода (табл. 14.3–14.5).

В [5] приведены формулы (в основном — эмпирические, по результатам эксплуатации) для большинства машин сельскохозяйственного производства. Они могут использоваться практически, как оценочные.

Таблица 14.3

Плющилки Murska

Параметры	М 220 S ₂	М 350 S ₂	М 700 S ₂	М 1000 S ₂	М 1400 S ₂ ×2	М 2000 S ₂ ×2
Производительность, т/ч	1	5	10	20	30	40
Потребляемая мощность, кВт	4	15÷30	20÷50	50	75	90
Масса, кг	130	320	550	700	1700	2200
Удельный расход энергии, кВт·ч/т	4	3÷6	2÷5	2,5	2,5	2,75

Таблица 14.4

Характеристики кормоприготовительных машин

Марка	Производительность, т/ч	Установленная мощность, кВт	Масса, кг	Удельный расход энергии кВт·ч/т
ЛИС-3А*	3,5	57	7200	15÷18
ИРТ-Ф-80-1	5	58	2500	11÷13
ИРТ-165	16	160	4000	9÷11
ИРМ-50	20	90	2950	4÷5
ИСК-Ф-10	10	42,5	2250	4÷5
МУИК-10	12	30	600	2,4÷3,0

Примечание. * ЛИС-3А — линия измельчения соломы, предназначена для приема, измельчения и выдачи в транспортное средство и на технологическую линию грубых кормов для дальнейшей обработки или переработки соломы, сена любой влажности в тюках, рулонах или россыпью. ИРТ-Ф-80-1 — измельчитель грубых кормов в рассыпном или прессованном виде. ИРТ-165 — измельчитель рулонов и тюков. ИРМ-50 — измельчитель растительных материалов (зерно, початки кукурузы). ИСК-Ф-10 — измельчитель-смеситель грубых кормов, зеленой массы, силоса, корнеплодов, зерна с дозированным внесением сыпучих добавок. МУИК-10 — малогабаритный универсальный измельчитель кормов: грубых, сочных, концентрированных.

14.5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ КОРМОПРИГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

В табл. 14.3–14.5 приведены технические характеристики некоторых отечественных и зарубежных кормоприготовительных машин.

Плющилки, вальцовые мельницы Murska финской фирмы Aimo Kortteen Конераја (табл. 14.3) используют

Таблица 14.5

Характеристики машин по производству комбикормов

Марка машины	Производительность, т/ч	Установленная мощность, кВт	Масса, кг	Удельный расход энергии, кВт·ч/т
Комбикормовый КА-4	4÷5	38	—	8÷9
Комбинированный малогабаритный АМК-1	1÷1,5	20	900	20÷14
«Комби-1А»	0,7	7,5	500	~10,0
АК-300	3	24	2300	8
Блочный-модульный УЗ-ДКА-1	1	26	—	24÷28
МКЗ-3. Малый комбикормовый завод	2÷4	22	10 830	10÷6
МКА	2	15	1500	7÷9

ся для плющения влажного зерна. Вальцовые ролики этих машин имеют точечно-рифленую поверхность.

В табл. 14.5 приведены характеристики машин для производства комбикормов. Промышленность выпускает как комплектное оборудование для производства комбикормов в хозяйствах, так и машины для выполнения отдельных технологических операций.

14.6. ВНУТРЕННИЙ ТРАНСПОРТ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ И ТЕПЛИЧНЫХ ХОЗЯЙСТВ

Внутренний транспорт ферм является важным звеном общего технологического процесса производства продукции. В зависимости от типа ферм (свино-, птице-, овце-, зверо-, КРС и т. д.) используется широкий спектр оборудования [45, 46, 47, 48].

Транспорт животноводческих ферм включает в себя в основном кормораздачу и вывоз остатков корма. В настоящее время для кормораздачи чаще используются комплексы на базе тракторного прицепа (рис. 14.10), а в последнее время и монорельсовые раздатчики-смесители (рис. 14.11). Раздатчики-смесители на рис. 14.10 обладают автономностью, мобильностью, но требуют дополнительных площа-

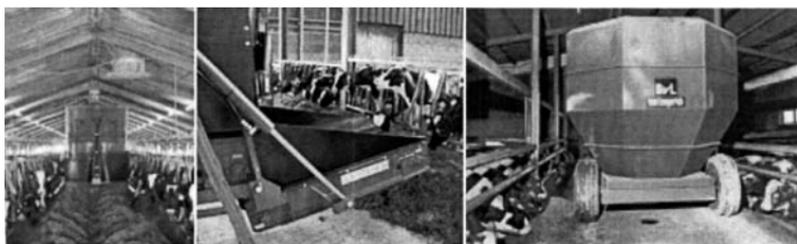


Рис. 14.10
Кормораздатчики на базе тракторного прицепа

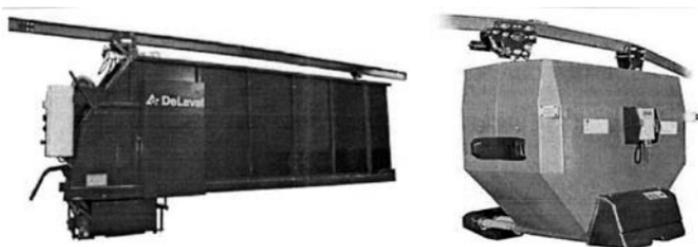


Рис. 14.11
Монорельсовые кормораздатчики DeLaval RA135 и Pellon Sikasukkula

дей, а при использовании тракторов с двигателями внутреннего сгорания являются источником вредных выбросов. Использование электротракторов исключает подобные выбросы, но снижает степень свободы действия агрегата.

Монорельсовые кормораздатчики — смесители (рис. 14.11) представляются наиболее перспективными и надежными системами для решения данных задач. Такое исполнение занимает меньше полезной площади, не привязывается к конкретному оборудованию, его можно использовать для различных устройств (модульное исполнение, сменные платформы и др.).

В качестве привода горизонтального перемещения в настоящее время используется система: вращающийся двигатель — редуктор — ведущие колеса на полках монорельса (рис. 14.12). Тяговое усилие передается через контакт «ведущее колесо — рельс» за счет коэффициента сцепления. При эксплуатации таких транспортных средств колеса со временем изнашиваются, причем неравномерно, контактная поверхность засоряется, сцепление может

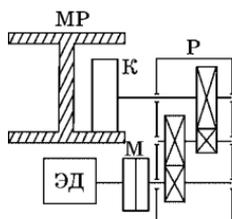


Рис. 14.12
Кинематическая схема
привода «мотор —
редуктор — колесо»:

ЭД — электродвигатель; М — муфта;
Р — редуктор; К — колесо;
МР — монорельс.



Рис. 14.13
Подвесная ручная транспортная
система для доильного оборудования

ухудшаться, а коэффициент трения (сила сопротивления) увеличивается, момент сопротивления движению носит переменный характер. Альтернативным вариантом привода перемещения вдоль монорельса представляется привод на основе линейного асинхронного двигателя (ЛАД) [27, 28, 29, 30].

Для облегчения труда операторов доения на фермах используется подвесная транспортная система (рис. 14.13), когда перемещение доильных аппаратов от стойла к стойлу осуществляется вручную по стальным рельсам облегченной конструкции. При этом оператор имеет под рукой все необходимые зоогигиенические средства обработки вымени до и после доения. Такая система, по сути, также является монорельсовой по типу кормораздачи (рис. 14.11) и обладает всеми указанными выше преимуществами.

В настоящее время ЛАД успешно используются в приводах конвейеров, робототехнических комплексах, транспортных средств, задвижек для трубопроводов, лифтах, металлургии, МГД насосов, дверей в вагонах, в атомной энергетике. В АПК применяются ЛАД колебательного движения при переработке зерна, сахарной промышленности и т. д. [27, 30].

Тепличные хозяйства занимаются выращиванием ранней внесезонной овощной продукции, а также рассады. Для Российской Федерации, основная территория которой расположена в северных широтах, круглогодичное снабжение населения свежими овощами имеет большое

значение. При конструировании, строительстве и эксплуатации теплиц важнейшими являются следующие показатели:

- коэффициент использования инвентарной площади;
- универсальность;
- трудоемкость, энергоемкость;
- капиталовложения на 1 м² площади;
- эксплуатационные расходы.

При этом очевидно стремление к повышению коэффициента использования инвентарной площади, снижению трудоемкости и энергоемкости продукции, минимизации капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Указанные показатели во многом зависят от конструкции теплицы, сезонности использования, системы энергообеспечения и поддержания микроклимата, организации технологического процесса, т. е. уровня механизации и автоматизации, работы агрохимлаборатории, растворных узлов для удобрений и пестицидов, складских помещений.

В тепличных хозяйствах велика доля ручного труда, и одной из важнейших внутренних систем теплиц является транспортная. По утверждению специалистов сегодня имеется возможность повысить производительность труда в полтора — два раза за счет комплексного решения задач, в том числе создания современной транспортной системы.

В существующих хозяйствах транспортные системы состоят из двух основных составляющих (рис. 14.14):

- внутренний транспорт между рядами;
- транспорт центрального прохода или тамбурного помещения для ангарных теплиц.

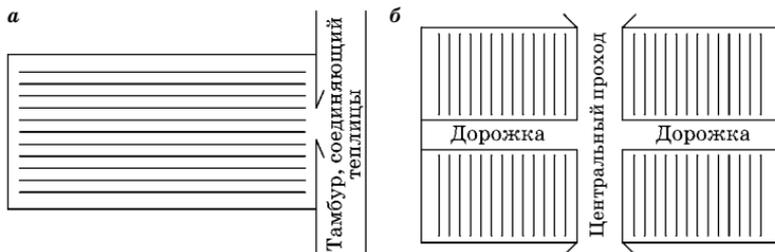


Рис. 14.14

Расположение проходов в теплицах блочных (а) и ангарных (б)

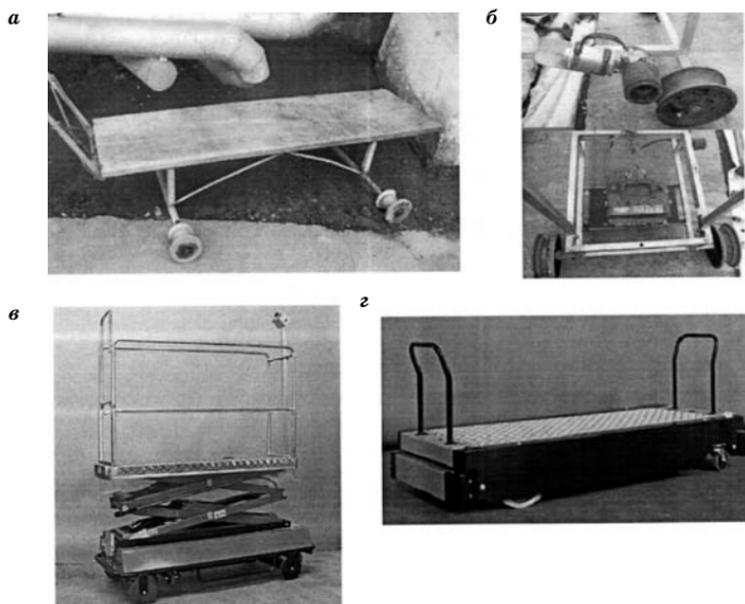


Рис. 14.15

Тележки для работы в тепличных хозяйствах:

а — ручные; *б* — самоходные; *в* — с подъемником до 3 м; *г* — напольные.

В междурядьях сконцентрирована основная работа в теплице: посадка, сбор урожая, смена грунта, обслуживание растений. К настоящему времени основными транспортными средствами являются тележки: ручные (рис. 14.15*а*), самоходные (рис. 14.15*б*), с подъемником для обработки высоких растений до 3 м (рис. 14.15*в*). Направляющими для перемещения тележки служат трубы системы обогрева или напольное исполнение (рис. 14.15*г*). Отечественные самоходные тележки имеют простейший привод от двигателя постоянного тока (аккумулятор на тележке) на колесо посредством фрикционной передачи. Недостатки такого привода очевидны: резиновый ролик быстро изнашивается; скорость движения не регулируется; только одно ведущее колесо приводит к перекосу тележки. Нагрузка такой тележки до 300 кг.

Свободными от указанных недостатков являются тележки производства Голландии по цене до 4000 долларов США (рис. 14.15*е*).

Вывезенная из междурядий продукция собирается, в основном, с помощью мини-тракторов с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) или электротрактора. Общий недостаток таких транспортных средств — нерациональное использование площади теплицы (ширина коридора не менее 3 м), притом что ее 1 м^2 со всеми системами обходится в 400–500 долларов США. Кроме того, тракторы с ДВС — источники вредных выхлопов. Обладая автономностью и мобильностью, эти системы практически не поддаются автоматизации.

В зависимости от конструкции теплиц (ангарные, блочные), т. е. длины междурядий, основное влияние на показатели транспортной системы имеет та или иная составляющая. В теплицах, как и на фермах, перспективным представляется монорельсовый транспорт с линейным асинхронным электроприводом. Это относится как к междурядьям, так и к транспорту центрального прохода даже в большей степени.

14.7. КОМПОНОВОЧНАЯ СХЕМА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Компоновочная схема линейного асинхронного привода перемещения кормораздатчика или грузовой платформы теплицы представлена на рис. 14.16. Такое исполнение позволяет: упростить кинематическую схему, исключить контакт «колесо — рельс», так как тяговое усилие передается посредством взаимодействия магнитных полей в зазоре; повысить надежность; более рационально использовать площадь теплицы; размещением индуктора снизу значительно разгрузить поддерживающие ролики за счет нормального к поверхности сердечника индуктора усилия; упростить перестановку платформы на другие линии.

В качестве монорельса используется стальная двутавровая балка, она же выполняет и роль обратного магнитопровода одностороннего ЛАД. Алюминиевая шина толщиной $(2 \div 3)$ мм является, по сути, вторичной обмоткой ЛАД [27, 28, 29, 30]. Трехфазная обмотка запитывается

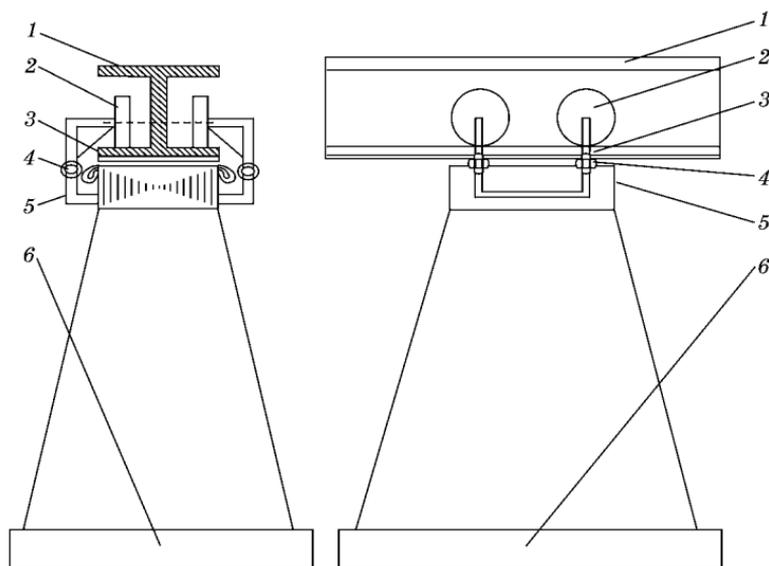


Рис. 14.16

Компоновочная схема платформы на основе ЛАД:

1 — двутавр (монорельс); 2 — поддерживающий ролик; 3 — алюминиевая шина; 4 — механизм регулирования зазора и откидывания поддерживающих роликов; 5 — индуктор ЛАД с обмоткой; 6 — платформа.

от источника напряжения пониженной частоты через преобразователь частоты.

Расчет характеристик — силы тяги, мощности, КПД, $\cos \varphi$ — может быть легко выполнен по методике [29], которая базируется на основе трехмерной расчетной модели ЛАД (см. рис. 14.17) методики [29] и программы для ЭВМ, успешно используемых при разработке линейных асинхронных электроприводов с различным конструктивным исполнением элементов — обмотки, типа реактивной шины, обратного магнитопровода, при условии постоянства тока или напряжения.

Заданными должны быть величина тягового усилия F_x , профиль двутавра, диаметр роликов, масса нетто платформы и грузоподъемность, скорость передвижения (пределы регулирования), воздушный зазор δ (от 2 до 4 мм), материал шины, возможности источника.

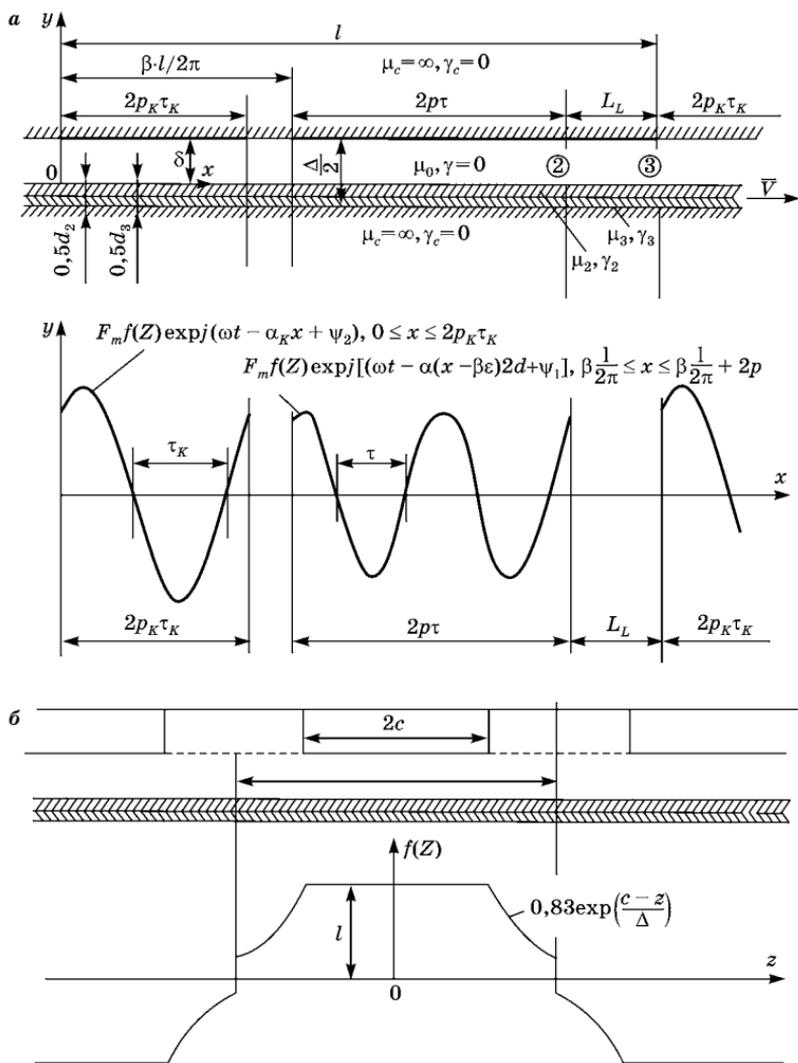


Рис. 14.17

Трехмерная расчетная модель:

a — по длине индуктора и высоте зазора ($x - y$); *b* — по ширине индуктора (z).

В качестве конкретного примера выполним расчеты для транспортного средства теплицы (центрального прохода) с грузоподъемностью платформы $m = 500$ кг. Для двутавра № 20 размер $l = 200$ мм (рис. 14.18), диаметр ро-

ликов $D_{\max} = 140$ мм (радиус $R = 70$ мм). Ширина индуктора $2c = 150$ мм. Минимальный воздушный зазор $\delta = (2 \div 3)$ мм, толщина РШ $d_2 = (2 \div 3)$ мм. Роль обратного магнитопровода выполняет нижняя полка двутавра, удельная электропроводимость стали $\gamma_3 = 5 \cdot 10^6$ см/м. Расчетная скорость движения $v_p = 2,5$ м/с = 9 км/ч. Минимальная и максимальная скорости достигаются регулированием частоты. Преобразователь частоты устанавливается на транспортном средстве, электроснабжение — по гибкому кабелю. Число полюсов индуктора $2p = 4$.

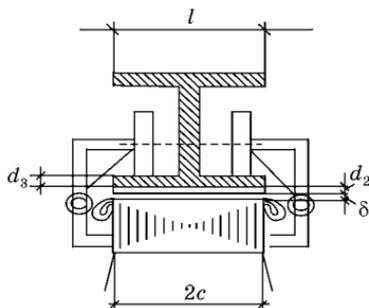


Рис. 14.18
Устройство ЛАД

Сила сопротивления движению (трение качения) зависит от вертикального усилия F_H , радиуса роликов R и коэффициента трения $K_{тр}$. Выражение для силы

$$F_{сопр} = K_{тр} \frac{F_H}{R}. \quad (14.11)$$

Величина $K_{тр} = (0,002 + 0,004)$ [54, 61] в зависимости от состояния поверхностей. Таким образом, при общей массе платформы $m_\Sigma = 600$ кг сила $F_H = mg = 6000$ Н, при $K_{тр} = 0,003$ сила сопротивления (без учета действия нормального усилия) по (14.11) будет

$$F_{сопр} = 0,003 \frac{6000}{0,07} = 257 \text{ Н.}$$

Активная площадь индуктора

$$S_{инд} = \frac{F_{сопр}}{F_{уд}} = \frac{257}{(0,3 \div 0,8)} = (856 \div 320) \text{ см}^2,$$

где $F_{уд}$ — удельная сила тяги из опыта эксплуатации ЛАД [28, 29], Н/см².

При ширине индуктора $2c = 0,15$ м = 15 см, необходимая длина $L_s = 2p\tau = S_{инд}/2c = (856 \div 320)/15 = (57 \div 21)$ см. Предварительно возьмем $L_s = 2p\tau = 0,432$ м, при этом:

- полюсное деление $\tau = 0,108$ м;

- зубцовое деление $t_1 = \tau/6 = 18$ мм;
- ширина паза $b_{\text{п}} = 10$ мм;
- ширина зубца $b_3 = 8$ мм [20, 22, 23].

Скорость движения $v = v_c(1 - s)$, где $v_c = 2\tau f$ — скорость магнитного поля; s — скольжение. При повышенных для ЛАД скольжениях $s = (0,1 \div 0,3)$, $v_c = \frac{v}{1-s} \cong 3,1$ м/с. Следовательно, частота $f_1 = v_c/2\tau = 14,35$ Гц; линейная токовая нагрузка индуктора $A = (30 \div 40) 10^3$ А/м; плотность тока в обмотке $J_1 = (4 \div 6)$ А/мм² [27, 28, 29]; объем тока в пазу $I_{\text{п}} = A \cdot t_1 = 35\,000 \cdot 0,018 = 630$ А [23, 24]; сечение меди в пазу $S_{\text{Cu}} = I_{\text{п}}/J_1 = 630/5 = 126$ мм².

Площадь сечения паза при коэффициенте заполнения паза медью $K_{\text{Cu}} \cong 0,5$

$$S_{\text{паз}} = \frac{S_{\text{Cu}}}{K_{\text{м}}} = \frac{126}{0,5} = 252 \text{ мм}^2.$$

$$\text{Высота паза } h_{\text{п}} = \frac{S_{\text{паз}}}{b_{\text{паз}}} = \frac{252}{10} = 25,2 \text{ мм}.$$

Высота клина крепления обмотки $h_{\text{кл}} = 5$ мм.

Далее исходные данные, в том числе и физические свойства материалов, вводятся в компьютерную программу и выполняется расчет характеристик в функции скольжения при $A = 35\,000$ А/м = const. Результаты расчета сведены в табл. 14.6.

Скольжение $s = 0,28$ можно принять за номинальный режим, при котором: $F_x = 264$ Н, $F_{\text{сопр}} = 257$ Н; КПД $\eta = 0,45$ — близкий к наибольшему значению; $\cos \varphi = 0,59$; энергетический фактор ($\eta \cdot \cos \varphi$) = $0,45 \cdot 0,59 = 0,266$. Отметим что при питании от преобразователя частоты (ПЧ) с широтно-импульсным регулированием (ШИР) реактивные токи замыкаются внутри ПЧ, а коэффициент мощности относительно сети переменного тока $\cos \varphi \approx 0,9 \div 0,95$.

Выбором числа витков обмотки (или витков в катушке $\omega_{\text{к}}$) по известному току в пазу $I_{\text{п}} = 630$ А определяется напряжение питания из соотношения

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \\ U_1 &= \frac{P_2}{3 \cdot I_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \end{aligned} \right\}. \quad (14.12)$$

Таблица 14.6

$I = \text{const} = 11,7 \text{ A}$							$U = 66 \text{ В}, f = 15 \text{ Гц}$			
s	$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$P_2, \text{ Вт}$	КПД	$\cos \varphi$	Z^*	$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$P_2, \text{ Вт}$	$I, \text{ А}$
0,04	60,9	2320	190	0,26	0,282	6,1	51	1955	160	10,7
0,08	114	2290	338	0,38	0,349	6,1	96	1930	286	10,7
0,12	158	2210	452	0,43	0,409	6	138	1925	392	10,9
0,16	195	2100	530	0,46	0,463	5,9	176	1892	478	11,1
0,2	224	1980	580	0,46	0,51	5,8	209	1846	541	11,3
0,24	246	1850	607	0,46	0,55	5,7	237	1786	585	11,5
0,28	264	1730	615	0,45	0,59	5,6	264	1730	616	11,7
0,32	277	1610	610	0,43	0,62	5,5	287	1669	633	11,9
0,36	286	1510	594	0,41	0,65	5,3	319	1686	662	12,4
0,4	293	1390	570	0,385	0,67	5,2	340	1612	661	12,6
0,44	298	1290	540	0,36	0,63	5,1	359	1555	652	12,8
0,48	300	1200	505	0,34	0,71	5	376	1505	634	13,1
0,52	301	1120	468	0,31	0,73	4,9	393	1463	611	13,4
0,56	300	1040	428	0,285	0,75	4,8	408	1416	582	13,7
0,6	299	974	387	0,26	0,76	4,7	424	1383	550	13,9
0,64	296	909	346	0,23	0,77	4,6	439	1347	512	14,2
0,68	293	849	304	0,205	0,785	4,5	454	1315	470	14,6
0,72	290	794	363	0,18	0,795	4,4	470	1286	426	14,9
0,76	286	744	222	0,15	0,805	4,3	485	1262	377	15,2
0,8	282	705	183	0,13	0,81	4,2	501	1253	325	15,6

Примечание. * $Z = Z/X_r$ — относительное сопротивление схемы замещения; X_r — главное индуктивное сопротивление.

Результаты расчета характеристики ЛАД в функции скольжения при $A = 35\,000 \text{ А/м}$, $\delta = 2 \text{ мм}$, $\gamma_2 = 5 \cdot 10^7 \text{ см/м}$, $\tau = 0,108 \text{ м}$, $2p = 4$, $2c = 0,15 \text{ м}$, $f = 15 \text{ Гц}$, $U = 66$, $B = \text{const}$.

Для $s = 0,28$ при $w_k = 1$, $f = 15 \text{ Гц}$

$$U_1 = \frac{615}{3 \cdot 630 \cdot 0,45 \cdot 0,59} = 1,223 \text{ В.}$$

При регулировании по закону $\frac{U}{f} = \text{const}$, базовой частоте $f_6 = 50 \text{ Гц}$ и соединении обмотки в звезду отношение

$\frac{U_{\phi}}{f} = \frac{220}{50} = 4,4$, следовательно, при $f = 15$ Гц фазное напряжение $U_{\phi} = 4,4 \cdot 15 = 66$ В.

Требуемое число витков в катушке обмотки

$$w_{\kappa} = \frac{66}{1,223} = 54.$$

$$\text{Ток } I_{\phi} = \frac{I_{\text{п}}}{w_{\kappa}} = \frac{630}{54} = 11,7 \text{ А.}$$

Реально сила сопротивления $F_{\text{сопр}}$ будет меньше, чем по (12), так как нормальная сила $F_{\text{н}} = 6000$, $F_{\text{y}} = 6000 - 1730 = 4270$ Н. При этом следует учитывать, что $F_{\text{y}} < F_{\text{плат}} = m_{\text{пл}} \cdot g$, где $m_{\text{пл}}$ — масса самой платформы, без груза. Масса индуктора с обмоткой $m_{\text{инд}} \cong 40$ кг.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Международная система единиц физических величин

Наименование	Название	Обозначение		Соотношение
		русское	международное	
Основные единицы				
Длина, L, l	метр	м	m	
Масса, M, m	килограмм	кг	kg	
Время, t	секунда	с	s	
Термодинамическая температура, θ	кельвин	К	K	
Количество вещества, Q	моль	моль	mol	
Сила света, I	кандела	кд	cd	
Механические величины				
Площадь, S	квадратный метр	м ²	m ²	$S = L^2$
Объем, V	кубический метр	м ³	m ³	$V = L^3$
Скорость, v	метр в секунду	м/с	m/s	$v = L/t$
Ускорение, a	метр на секунду в квадрате	м/с ²	m/s ²	$a = \Delta v/\Delta t$
Частота, f	герц	Гц	Hz	$f = 1/T$
Частота вращения, n	секунда в минус первой степени	с ⁻¹	s ⁻¹	
Угловая скорость, ω	радиан в секунду	рад/с	rad/s	$\omega = \Delta\varphi/\Delta t$
Угловое ускорение, ε	радиан на секунду в квадрате	рад/с ²	rad/s ²	$\varepsilon = \Delta\omega/\Delta t$
Плотность вещества, ρ	килограмм на кубический метр	кг/м ³	kg/m ³	$\rho = m/V$
Момент инерции, J	килограмм-метр в квадрате	кг·м ²	kg·m ²	$J = m \cdot l^2$
Сила, F	ньютон	Н	N	$F = m \cdot a$

Продолжение табл. 1

Наименование	Название	Обозначение		Соотношение
		русское	международное	
Момент силы, M	ньютон-метр	Н·м	N·m	$M = F \cdot l$
Давление, p	паскаль	Па	Pa	$p = F/S$
Мощность, P	ватт	Вт	W	$P = \Delta W/\Delta t$
Работа, энергия, W	джоуль	Дж	J	$W = F \cdot l$
Тепловые величины				
Количество теплоты, Q	джоуль	Дж	J	
Теплоемкость и энтропия, C	джоуль на кельвин	Дж/К	J/К	$C = \Delta Q/\Delta \theta$
Удельная теплоемкость, c	джоуль на килограмм-кельвин	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$c = C/m$
Коэффициент теплопроводности, λ	джоуль на кельвин-метр-секунду	$\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}$	$\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}$	$\lambda = \frac{\Delta Q}{\frac{\Delta \theta}{\Delta l} \cdot \Delta t \cdot \Delta s}$
Коэффициент линейного расширения, α	единица на градус кельвина	1/К	1/К	$\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 \cdot \Delta \theta}$
Электрические и магнитные величины				
Плотность электрического тока, J	ампер на квадратный метр	A/м ²	A/m ²	$J = I/S$
Электрический заряд, q	кулон	Кл	C	$q = I \cdot t$
Электрический потенциал, напряжение, ЭДС, ϕ , U , E , e	вольт	В	V	$U = A/q$, A — работа по переносу заряда
Напряженность электрического поля, E	вольт на метр	В/м	V/m	$E = F/q$
Электрическое сопротивление, R	ом	Ом	Ω	$R = \frac{U}{I} = \rho \frac{l}{S}$
Электрическая емкость, C	фарад	Ф	F	$C = q/U$

Продолжение табл. 1

Наименование	Название	Обозначение		Соотношение
		русское	международное	
Удельное электрическое сопротивление, ρ	Ом-метр	Ом·м	$\Omega \cdot m$	$\rho = \frac{R \cdot S}{l}$
Электрическая проводимость, G	сименс	См	S	$G = \frac{I}{R} = \frac{\gamma \cdot S}{l}$
Удельная электрическая проводимость, γ	сименс на метр	См/м	S/m	$\gamma = \frac{G \cdot l}{S}$
Магнитный поток, Φ	вебер	Вб	Wb	$\Delta\Phi = e \cdot \Delta t$
Магнитная индукция, B	тесла	Тл	T	$B = \Phi/S$
Магнитодвижущая сила, F	ампер	A	A	$F = H \cdot l = \Phi \cdot R_m$
Намагничивающая сила катушки, F	ампер	A	A	$F = I \cdot w$
Напряженность магнитного поля, H	ампер на метр	A/м	A/m	$H = \frac{I}{2\pi r}$
Магнитное сопротивление, R_m	ампер на вебер	A/Вб	A/Wb	$R_m = \frac{F}{\Phi} = \frac{l}{\mu \cdot S}$
Магнитная проницаемость, μ	генри на метр	Гн/м	H/m	$\mu = B/H$
Индуктивность, взаимная индуктивность, $L, M_{1,2}$	генри	Гн	H	$L = \Psi/I$
Светотехнические единицы				
Световой поток, Φ	люмен	лм	lm	
Освещенность, E	люкс	лк	lx	1 лк = 1 лм/м ²
Светимость, R	люмен на квадратный метр	лм/м ²	$\frac{lm}{m^2}$	$R = \Phi/S$
Яркость, B	кандела на квадратный метр	кд/м ²	$\frac{cd}{m^2}$	$B = \frac{I}{S}$
Поток излучения, Φ_e	ватт	Вт	W	$\Phi_e = \frac{W}{t}$
Энергетическая освещенность и светимость, B_e	ватт на стерадиан-квадратный метр	$\frac{Вт}{ср \cdot м^2}$	$\frac{W}{sr \cdot m^2}$	$B_e = \frac{\Phi_e}{S}$

Таблица 2

**Множители и приставки для образования десятичных
кратных и дольных единиц**

Множитель	Приставка	Обозначение	
		русское	международное
10^{18}	экса	Э	E
10^{15}	пета	П	P
10^{12}	тера	Т	T
10^9	гига	Г	G
10^6	мега	М	M
10^3	кило	к	k
10^2	гекто	г	h
10	дека	да	da
10^{-1}	деци	д	d
10^{-2}	санти	с	c
10^{-3}	милли	м	m
10^{-6}	микро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	пико	п	p
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	атто	а	a

Таблица 3

Основные физические константы

Наименование	Значение	Единица измерения
Заряд электрона, e	$1,602 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса электрона, m_e	$9,109 \cdot 10^{-31}$	кг
Масса протона, m_p	$1,672 \cdot 10^{-27}$	кг
Магнитная постоянная, μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	Гн/м
Электрическая постоянная, ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12}$	Ф/м
Скорость света	$3 \cdot 10^8$	м/с
Скорость звука в воздухе	331	м/с
Скорость звука в водороде	1284	м/с
Скорость звука в воде	1500	м/с
Скорость звука в трансформаторном масле	1425	м/с
Скорость звука в железе	≈ 5000	м/с

Таблица 4

Коэффициент теплопроводности материалов

Материал	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	Материал	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Алюминий	209,3	Бумага обыкновенная	0,14
Железо	74,4	Гранит	3,14
Золото	312,8	Дуб (вдоль волокон)	0,35÷0,43
Медь	389,6	Кирпичная кладка	0,67÷0,87
Серебро	418,7	Лакоткань	0,21
Сталь	45,4	Асбест	0,15
Чугун	62,8	Пропитанная лаком изоляция пазов	0,10
Сталь листовая вдоль слоя	63	Изоляция кл. В	0,16
Сталь листовая лакированная поперек слоя	1,2	Изоляция кл. F	0,16
Воздух	0,026	Изоляция кл. Н	0,18

Таблица 5

Коэффициент линейного расширения твердых тел
(при температуре около 20°C)

Вещество	$\alpha, 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	Вещество	$\alpha, 10^{-6} \text{ К}^{-1}$
Алюминий	22,9	Медь	16,7
Бронза	17,5	Никель	13,4
Вольфрам	4,3	Олово	21,4
Гранит	8,3	Платина	8,9
Дерево (поперек волокон)	50÷60	Свинец	28,3
Золото	14,5	Сталь углеродистая	11÷12,6
Кирпичная кладка	5,5	Стекло обычное	8,5
Константан	17,0	Фарфор	3,0
Магний	25,1	Цинк	30,0

Таблица 6

**Температурный коэффициент сопротивления металлов
(при температуре 20°C)**

Металл	$\alpha, 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	Металл	$\alpha, 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Алюминий	4,9	Никель	5,0
Бронза	4,0	Олово	4,2
Вольфрам	4,5	Ртуть	0,9
Железо	6,2	Свинец	4,1
Латунь	2÷7	Серебро	3,6
Медь	4,0	Цинк	3,5

Таблица 7

**Удельные теплоемкости и температуры плавления $\theta_{пл}$
некоторых веществ**

Вещество	$C, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ при 20°C	$\theta_{пл}, \text{ }^\circ\text{C}$	Вещество	$C, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ при 20°C	$\theta_{пл}, \text{ }^\circ\text{C}$
Алюминий	880	658	Магний	130	651
Ацетон	2180	-94,3	Медь	390	1083
Германий	310	958	Никель	460	1452
Дерево	1700÷2400	—	Олово	230	232
Железо	450	1530	Свинец	130	327
Золото	130	1064	Серебро	235	961,9
Латунь	380	900	Сталь	460	1300÷1400
Лед (вода)	4190	0	Вольфрам	218	3400

Таблица 8

Удельная теплота сгорания

Топливо	$W, \text{ МДж}/\text{кг}$	Топливо	$W, \text{ МДж}/\text{кг}$
Антрацит	32÷34	Дизельное топливо	42,7
Бурые угли	25÷29	Мазут	39÷41
Горючие сланцы	27÷33	Этиловый спирт	27,2
Дрова	19,0	Водород	11,0
Торф	22÷25	Природный газ	36,0
Бензин	44,1		

Таблица 9

Удельная электрическая проводимость проводниковых материалов при 20°C

Материал	γ , См/м	Материал	γ , См/м
Алюминий	$3,57 \cdot 10^7$	Никель	$1 \cdot 10^7$
Вольфрам	$1,82 \cdot 10^7$	Свинец	$0,45 \cdot 10^7$
Сталь	$(5 \div 10) \cdot 10^6$	Серебро	$6,25 \cdot 10^7$
Латунь	$(1,6 \div 4) \cdot 10^7$	Константан	$(2,2 \div 1,9) \cdot 10^4$
Медь	$5,7 \cdot 10^7$	Нихром	$1 \cdot 10^4$

Таблица 10

Плотность материалов при 20°C

Материал	ρ , кг/м ³	Материал	ρ , кг/м ³
Алюминий	2700	Резина твердая	1200
Бронза	8700÷8900	Стекло обыкновенное	2500
Вольфрам	19 340	Фарфор	2200÷2400
Сталь	7800	Винипласт	1400
Золото	19 310	Полистирол	1060
Константан	8800	Текстолит	1350
Медь	8900	Фторопласты	2100÷2400
Платина	21 460	Вода	1000
Ртуть	13 600	Бензин	700
Уран	19 100	Масло машинное	900
Чугун	7000	Молоко ср. жирности	1030
Асбест	2500	Этиловый спирт	790
Графит	2220	Воздух	1,293
Кварц	2650	Водород	0,09
Дерево	500÷900	Криптон	3,74

Таблица 11

Основная таблица намагничивания. Сталь 2312

В, Тл	Н, А/м	$\mu = \frac{B}{H},$ Гн/м	$\mu_y = \frac{\mu}{\mu_0}$	В, Тл	Н, А/м	$\mu = \frac{B}{H},$ Гн/м	$\mu_y = \frac{\mu}{\mu_0}$
0,4	68	$5,88 \cdot 10^{-3}$	4680	1,5	1600	$9,37 \cdot 10^{-4}$	746
0,5	76	$6,58 \cdot 10^{-3}$	5238	1,6	3400	$4,7 \cdot 10^{-4}$	374
0,6	86	$6,98 \cdot 10^{-3}$	5557	1,7	7700	$2,2 \cdot 10^{-4}$	175
0,7	96	$7,29 \cdot 10^{-3}$	5804	1,8	13 400	$1,34 \cdot 10^{-4}$	107
0,8	140	$5,71 \cdot 10^{-3}$	4546	1,9	19 400	$9,8 \cdot 10^{-5}$	78
0,9	190	$4,74 \cdot 10^{-3}$	3773	2,0	38 800	$5,85 \cdot 10^{-5}$	41
1,0	240	$4,166 \cdot 10^{-3}$	3316	2,1	74 000	$2,83 \cdot 10^{-5}$	22,5
1,1	300	$3,66 \cdot 10^{-3}$	2914	2,2	144 000	$1,52 \cdot 10^{-5}$	12,1
1,2	400	$3,0 \cdot 10^{-3}$	2388	2,3	224 000	$1,03 \cdot 10^{-5}$	8,2
1,3	550	$2,36 \cdot 10^{-3}$	1878	2,4	304 000	$7,89 \cdot 10^{-6}$	6,28
1,4	1000	$1,4 \cdot 10^{-3}$	1114				

Таблица 12

Технические данные двигателей серии АИР.
Синхронная частота вращения 1500 об/мин

Тип двигателя	$P_n, \text{ кВт}$	$\eta_n, \%$	$\cos \varphi_n$	$S_n, \%$	M_n/M_n	M_{\max}/M_n	M_{\min}/M_n	I_n/I_n	Момент инерции, кг·м ²	Масса, кг
АИР50А4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000029	2,6
АИР50В4	0,09	57	0,65	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000033	2,9
АИР56А4	0,12	63	0,66	10	2,3	2,2	1,8	5	0,00070	3,35
АИР56В4	0,18	64	0,68	10	2,3	2,2	1,8	5	0,00079	3,9
АИР63А4	0,25	68	0,67	12	2,3	2,2	1,8	5	0,0012	4,7
АИР63В4	0,37	68	0,7	12	2,3	2,2	1,8	5	0,0014	5,6
АИР71А4	0,55	70,5	0,7	9,5	2,3	2,2	1,8	5	0,0013	7,8
АИР71В4	0,75	73	0,76	10	2,2	2,2	1,6	5	0,0014	8,8
АИР80А4	1,1	75	0,81	7	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0032	9,9
АИР80В4	1,5	78	0,83	7	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0033	12,1
АИР90Л4	2,2	81	0,83	7	2,1	2,2	1,6	6,5	0,0056	17

Продолжение табл. 12

Тип двигателя	P_n , кВт	η_n , %	$\cos \varphi_n$	S_n , %	M_n/M_n	M_{max}/M_n	M_{min}/M_n	I_n/I_n	Момент инерции, кг·м ²	Масса, кг
АИР100S4	3	82	0,83	6	2	2,2	1,6	7	0,0087	21,6
АИР100L4	4	85	0,84	6	2	2,2	1,6	7	0,011	27,3
АИР112М4	5,5	85,5	0,86	4,5	2	2,5	1,6	7	0,017	41
АИР132S4	7,5	87,5	0,86	4,0	2	2,5	1,6	7,5	0,028	58
АИР132М4	11	87,5	0,87	3,5	2	2,7	1,6	7,5	0,04	70
АИР160S4	15	90	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	0,078	100
АИР160М4	18,5	90,5	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	0,1	110
АИР180S4	22	90,5	0,87	2,5	1,7	2,4	1,5	7	0,15	170
АИР180М4	30	92	0,87	2	1,7	2,7	1,5	7	0,19	190
АИР200М4	37	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	0,28	245
АИР200S4	45	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	0,34	270
АИР225М4	55	93	0,89	2	1,7	2,6	1,6	7	0,51	335
АИР250S4	75	94	0,88	1,5	1,7	2,5	1,4	7,5	0,89	450
АИР250М4	90	94	0,89	1,5	1,5	2,5	1,3	7,5	1,1	480
АИР280S4	110	93,5	0,91	2,2	1,6	2,2	1	6,5	2,3	594
АИР280М4	132	94	0,93	2,2	1,6	2,2	1	6,5	2,5	752
АИР315S4	160	93,5	0,91	2	1,4	2	1	5,5	3,1	896
АИР315М4	200	94	0,92	2	1,4	2	0,9	5,5	3,6	1000
АИР355S4	250	94,5	0,92	2	1,4	2	0,9	7	6	1275
АИР355М4	315	94,5	0,92	2	1,4	2	0,9	7	7	1480

Таблица 13

**Технические данные крановых электродвигателей
с фазным ротором, ПВ = 40%, 380 В, 50 Гц**

Тип	Число полюсов	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Ток статора, А	$\cos \varphi$	Ток ротора, А	Напряжение ротора, В	Максимальный момент, Н·м
4МТФ(Н)112L4	4	3,7	1370	10,5	0,82	—	—	57
4МТФ(Н)112LB4	4	5,5	1390	15	0,81	—	—	94

Продолжение табл. 13

Тип	Число полюсов	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Ток статора, А	cos φ	Ток ротора, А	Напряжение ротора, В	Максимальный момент, Н·м
4МТФ(Н)132L4	4	7,5	1400	19	0,84	—	—	126
4МТФ(Н)132LB4	4	11	1410	28	0,86	—	—	205
4МТФ(Н)112L6	6	2,2	810	7,2	0,76	11	144	55
4МТФ(Н)112LB6	6	3,7	900	11,2	0,79	13,8	190	88
4МТФ(Н)132L6	6	5,5	915	14,8	0,74	18,3	213	135
4МТФ(Н)132LB6	6	7,5	935	18,2	0,77	20,7	242	190
4МТФ(Н)160L6	6	11	910	32	0,76	41	179	325
4МТФ(Н)160LB6	6	15	930	39	0,77	48	213	460
4МТФ(Н)160L8	8	7,5	695	25	0,73	22	227	248
4МТФ(Н)160LB8	8	11	705	38	0,74	39	185	400
4МТФ(Н)200L8	8	15	710	42	0,71	48,8	206	569

Таблица 14

Технические данные крановых электродвигателей с короткозамкнутым ротором, ПВ = 40%, 380 В, 50 Гц

Тип	Число полюсов	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Ток статора, А	cos φ	Максимальный момент, Н·м	Пусковой момент, Н·м	Пусковой ток, А	Плотность номинального тока, А/мм ²
4МТКФ(Н)112L4	4	3,7	1390	10,5	0,83	56	56	41	8,8
4МТКФ(Н)112LB4	4	5,5	1400	15,2	0,82	91	85	61	8,5
4МТКФ(Н)132L4	4	7,5	1390	18,5	0,85	131	121	87	8,3
4МТКФ(Н)132LB4	4	11,0	1410	27,5	0,87	215	195	152	8
4МТКФ(Н)112L6	6	2,2	880	6,8	0,73	64	62	22,7	8,5
4МТКФ(Н)112LB6	6	3,7	870	10,6	0,75	114	114	37,2	8,7
4МТКФ(Н)132L6	6	5,5	900	13,6	0,75	155	145	57	8,6
4МТКФ(Н)132LB6	6	7,5	900	18,3	0,7	225	216	79	8,3
4МТКФ(Н)160L8	8	7,5	690	24	0,71	310	260	91,5	7,3
4МТКФ(Н)160LB8	8	11	700	33,5	0,74	500	420	141	7,4

Таблица 15

**Технические данные двухскоростных крановых
электродвигателей 380 В, 50 Гц**

Тип	Число полюсов	Мощность, кВт	ПВ, %	Частота вращения, об/мин	Ток статора, А	Пусковой ток, А	Пусковой момент, Н·м	Максимальный момент, Н·м
4МТКН160L6/16	6	3,5	40	920	9,3	42	85	98
	16	1,1	15	305	9	14	69	69
4МТКН160LB6/16	6	5	40	925	14	70	142	162
	16	1,8	15	305	12,3	22	108	108
4МТКН200L6/16	6	7,5	40	930	17,5	93	196	215
	16	2,4	15	300	14	25	167	167
4МТКН200LB6/16	6	11	40	940	27	145	353	383
	16	3,5	15	295	20	37	226	226
4МТКН225M6/20	6	16	40	925	38	195	422	490
	20	3,4	15	235	25	40	314	314
4МТКН225L6/20	6	22	40	925	49	265	630	690
	20	4,5	15	225	33	52	470	470
4МТКН225LB6/20	6	30	40	910	61	320	850	890
	20	6	15	650	42	68	540	540
МТКФ2114/12	4	4	25	1385	10	47	63	73
	12	1	15	395	7,3	12,5	52	52
МТКФ4104/24	4	7	25	1370	12,5	60	108	108
	24	0,8	15	200	9,2	17	84	85
МТКФ4114/24	4	10	25	1300	20	100	176	176
	24	1,2	15	165	13,4	18	118	118

Таблица 16

**Характеристика преобразователя частоты фирмы SEW
для двигателя мощностью 30 кВт**

Показатель	Значения
Вход	
Напряжение сети, U_c	Трехфазная сеть 3×380 В
Частота сети, f_c	50/60 Гц
Номинальный ток сети, I_c	54 А
Выход	
Выходное напряжение	3×0÷380 В, $U/f = \text{const}$ с $I \times R$ -компенсацией
Выходная частота	0÷400 Гц
Выходной ток, I_n	60 А
Частота ШИМ	4/8/12/16 кГц
Разрешение по частоте	0,005 Гц
Потери мощности при I_n	950 Вт
Ограничение тока	125% I_n в продолжительном режиме, 150% I_n до 60 с
Время пуска	0÷999 с
Масса	15 кг

Таблица 17

**Параметры стандартных IGBT-модулей
(ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск)**

Тип	$U_{кз}$	$I_{кол}$	$I_{к\text{ или }мп}$	$\Delta U_{кз}$	$t_{откр}$	$t_{закр}$	Θ_{max}	$U_{пз}$	m
	В	А	А	В	μс	μс	°С	В	кг
Корпус 25×38 мм									
МТКИ-15-12	1200	15	30	2,5	0,1	0,4	150	2500	0,025
МТКИ-25-12	1200	25	50	2,5	0,14	0,42	150	2500	0,025
МТКИ-50-12	1200	50	100	2,5	0,1	0,38	150	2500	0,025
МТКИ-50-12-1	1200	50	100	2,5	0,1	0,38	150	2500	0,025

Продолжение табл. 17

Тип	$U_{кз}$	$I_{кол}$	$I_{к\text{ или мп}}$	$\Delta U_{кз}$	$t_{откр}$	$t_{закр}$	Θ_{max}	$U_{из}$	m
	В	А	А	В	мс	мс	°С	В	кг
Корпус 61,5×106,5 мм									
МТКИ2-200-12	1200	200	400	2,5	0,19	0,55	150	2500	0,35
МТКИ2-300-12	1200	300	600	2,5	0,21	0,6	150	2500	0,35
МТКИ2-400-12	1200	400	800	2,5	0,21	0,55	150	2500	0,35
Корпус 130×140 мм									
МТКИ-800-12	1200	800	1600	2,7	0,8	1,0	150	2500	1,5
МТКИ-1200-12	1200	1200	2400	2,7	0,8	1,0	150	2500	1,5
МТКИ-1600-12	1200	1600	3200	2,7	0,8	1,0	150	2500	1,5
МТКИ-1000-25	2500	1000	2000	3,0	1,05	2,2	150	5000	1,5
МТКИ-800-33	3300	800	1600	3,5	0,62	1,7	150	6000	1,5
Корпус 140×190 мм									
МТКИ-1800-12	1200	1800	3600	2,7	0,8	1,0	150	2500	2,1
МТКИ-2400-12	1200	2400	4800	2,7	0,8	1,0	150	2500	2,1
МТКИ-1500-25	2500	1500	3000	3,0	1,05	2,2	150	5000	2,1
МТКИ-1200-33	3300	1200	2400	3,5	0,62	1,7	150	6000	2,1
Корпус 61,5×106,5 мм									
МТКИ-200-12Н	1200	200	400	2,1	0,19	0,59	150	2500	0,35
МТКИ-300-12Н	1200	300	600	2,1	0,19	0,59	150	2500	0,35
МТКИ-400-12Н	1200	400	800	2,1	0,19	0,59	150	2500	0,35
МТКИ2-200-12Н	1700	200	400	2,7	0,2	0,9	150	4000	0,35
МТКИ2-300-12Н	1700	300	600	2,7	0,2	0,9	150	4000	0,35
МТКИ2-400-12Н	1700	400	800	2,7	0,2	0,9	150	4000	0,35
Корпус 130×140 мм									
МТКИ2-800-12Н	1200	800	1600	2,1	0,45	1,0	150	2500	1,5
МТКИ2-1200-12Н	1200	1200	2400	2,1	0,75	1,14	150	2500	1,5
МТКИ2-1600-12Н	1200	1600	3200	2,1	0,49	1,16	150	2500	1,5
МТКИ2-800-12Н	1700	800	1600	2,7	0,44	1,1	150	4000	1,5
МТКИ2-1200-12Н	1700	1200	2400	2,7	0,46	1,1	150	4000	1,5
МТКИ2-1600-12Н	1700	1600	3200	2,7	0,49	1,2	150	4000	1,5

Таблица 18

Магнитные пускатели серий ПМЕ и ПАЕ

Тип	Номинальный ток, А, при напряжениях 380/500 В	Габаритные размеры, мм	Наличие теплового реле
ПМЕ-001	3/1,5	75×65×119	нет
ПМЕ-002	3/1,5	121×83×101	есть
ПМЕ-003	3/1,5	90×150×118	нет
ПМЕ-004	3/1,5	135×150×118	есть
ПМЕ-111	10/6	68×85×84	нет
ПМЕ-112	10/6	154×102×91	есть
ПМЕ-113	10/6	164×90×106	нет
ПМЕ-114	10/6	232×90×107	есть
ПМЕ-211	25/14	102×90×118	нет
ПМЕ-212	25/14	195×98×126	есть
ПМЕ-213	25/14	130×205×155	нет
ПМЕ-214	25/14	180×205×155	есть
ПАЕ-311	40/21	214×114×144	нет
ПАЕ-312	40/21	275×114×121	есть
ПАЕ-313	40/21	214×239×114	нет
ПАЕ-314	40/21	264×239×121	есть
ПАЕ-411	63/35	290×183×135	нет
ПАЕ-412	63/35	290×183×135	есть
ПАЕ-413	63/35	275×343×135	нет
ПАЕ-414	63/35	275×343×135	есть
ПАЕ-511	110/61	335×200×156	нет
ПАЕ-512	110/61	335×200×156	есть
ПАЕ-513	110/61	320×338×170	нет
ПАЕ-514	110/61	320×338×170	есть
ПАЕ-611	146/80	380×230×190	нет
ПАЕ-612	146/80	380×230×190	есть
ПАЕ-613	146/80	385×435×190	нет
ПАЕ-614	146/80	385×435×190	есть

Таблица 19

Трехфазные тиристорные пускатели

Параметр	ПТ-16-380-У5, ПТ-16-380Р-У5	ПТ-40-380-У5, ПТ-40-380Р-У5	ПТК-100-380-БПК-1000	ПТУ-63-380
Номинальное напряжение, В	380	380	380	380
Номинальный ток, А	16	40	100	63
Ток включения, А	100÷130	200÷360	—	—
Ток отключения, А	16÷25	40÷63	—	—
Стойкость при сквозных токах, А:				
термическая (при 0,1 с)	400	900	—	—
электродинамическая	560	1650	—	—
Ток утечки, мА	20	20	20	20
Сопротивление изоляции в холодном состоянии, МОм	50	50	—	—
Коммутационная способность, А	400	900	1000	1700
Включающая способность, А	580	1650	1700	1700
Назначение	Включе-ние и отключе-ние асинхронных двигателей	Включе-ние, отключе-ние и реверс асинхронных двига-телей	Для комму-тации и защиты от перегрузок, коротких замыканий, обрыва фаз	Для комму-тации и защиты от коротких замыканий и перегрузок

Таблица 20

Параметры предохранителей типа ПР-2, 500 В

Тип предохранителя	Номинальный ток, А	Номинальные токи плавких вставок, А	Предельный ток отключения при напряжении		Габаритные размеры, мм
			380 В	500 В	
ПР-2-15	15	6; 10; 15	8000	7000	171×24,5×33
ПР-2-60	60	15; 20; 25; 35; 45; 60	4500	3500	173×30,5×43
ПР-2-100	100	60; 80; 100	—	—	247×43×56
ПР-2-200	200	100; 125; 160; 200	11 000	10 000	296×56×76,5
ПР-2-350	350	200; 225; 260; 300; 350	13 000	11 000	346×72×10
ПР-2-600	600	350; 430; 500; 600	23 000	—	442×140×154
ПР-2-1000	1000	600; 700; 850; 1000	20 000	20 000	580×155×154

Таблица 21

Технические данные автоматов из серии АК, АЕ, АП

Тип	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Число полюсов	Ток уставки, А	Предельный ток отключения, кА	
					Постоянный	Переменный
АК-63	63	200÷440	2, 3	0,63÷63	5	9
АК-50	50	320÷400	2, 3	2÷50	4,5	9
АП-50	50	220÷500	2, 3	1,6÷50	1,252	0,3÷2
А-63	25	110÷220	1	0,63÷25	2	2,5
АЕ-1000	25	240	1	6÷25	—	1,5
АЕ-2000	25, 63, 100	220÷500	1, 2, 3	—	10	16
АС-25	25	220÷380	2, 3	1÷20	3,2	2
АСТ-2/3	25	380	2, 3	—	90	—
АЕ-2443	16, 20, 25, 5, 31, 40, 50, 63	380	3	—	—	—

Таблица 22

Технические характеристики центробежных вентиляторов Ц4-70

Показатель	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Подача, тыс. м ³ ·ч ⁻¹	0,55÷3,3	0,87÷4,25	1,45÷8,3	2,6÷14,5	4,1÷24
Диаметр рабочего колеса, мм	300	400	500	600	700
Полное давление, Па	160÷1150	160÷500	180÷830	260÷1200	320÷1710
Частота вращения, об/мин ⁻¹	1410÷2850	930÷1410	930÷1420	930÷1440	950÷1460
Мощность электродвигателя, кВт	0,6÷1,0	0,6÷1,0	1,0÷1,7	1,7÷4,5	2,8÷10,0
Габаритные размеры, мм:					
длина	540	718	1068	1068	1248
ширина	300	400	450	600	650
высота	278	688	933	1111	1309
Масса, кг	21	41	85	113	207

Таблица 23

**Основные технические характеристики насосных агрегатов
типа К, КМ**

Марка насоса	Подача, м ³ /ч	Напор, м	Частота вращения, об/мин	Мощность двигателя, $P_{д}$, кВт
К 8/18	8	18	2900	2,2
К 50-32-125	12,5	20	2900	2,2
К 20/18	20	18	2900	3
К 20/30	20	30	2900	4
К 65-50-125	25	20	2900	3
К 65-50-160	25	32	2900	5,5
К 45/30	45	30	2900	7,5
К 45/55	45	55	2900	15
К 80-50-200	50	50	2900	15
К 80-50-200а	45	40	2900	11
К 90/20	90	20	2900	7,5
К 90/35	90	35	2900	15
К 90/55	90	55	2900	30
К 90/85	90	85	2900	45
К 150-125-315	200	32	1450	30
К 200-150-250	315	20	1450	30
К 200-150-315	315	32	1450	45
КМ 50-32-125	12,5	20	2900	2,2
КМ 65-50-160	25	32	2900	5,5
КМ 80-50-200	50	50	2900	15
КМ 80-65-160	50	32	2900	7,5
КМ 100-80-160	100	32	2900	15
КМ 100-65-200	100	50	2900	30
КМ 150-125-250	200	20	1450	18,5

Таблица 24

**Основные технические характеристики артезианских
(погружных) насосных агрегатов**

Марка насоса	Тип двигателя	$P_{дв}$, кВт	Подача, м ³ /ч	Напор, м	Частота вращения, об/мин	Высота, мм	Диаметр, мм	М., кг
ЭЦВ 5-4-125	ПЭДВ 2,8-140	2,8	4	125	2900	1812	120	63

Продолжение табл. 24

Марка насоса	Тип двигателя	$P_{дв}$, кВт	Подача, м ³ /ч	Напор, м	Частота вращения, об/мин	Высота, мм	Диаметр, мм	М _н , кг
ЭЦВ 5-6,3-80	ПЭДВ 2,8-140	2,8	6,3	80	2900	1650	120	59
ЭЦВ 6-4-130	ПЭДВ 2,8-140	2,8	4	130	2900	1650	145	78
ЭЦВ 6-4-190	ПЭДВ 4,5-140	4,5	4	190	2900	2000	145	95
4ЭЦВ 6-6,3-85	ПЭДВ 2,8-140	2,8	6,3	85	2900	1540	145	72
1ЭЦВ 6-6,3-185	ПЭДВ 5,5-140	5,5	6,3	185	2900	2000	145	88
1ЭЦВ 6-10-50	ПЭДВ 2,8-140	2,8	10	50	2900	1350	145	69
1ЭЦВ 6-10-140	ПЭДВ 8-140	8	10	140	2900	1940	145	100
1ЭЦВ 6-10-185	ПЭДВ 8-140	8	10	185	2900	2220	145	110
ЭЦВ 6-10-235	ПЭДВ 11-140	11	10	235	2900	2530	145	125
ЭЦВ 6-16-110	ПЭДВ 8-140	8	16	110	2900	1860	145	190
ЭЦВ 8-25-300	ПЭДВ 32-219	32	25	300	2900	3955	186	355
ЭЦВ 8-40-180	ПЭДВ 32-219	32	40	180	2900	3105	186	308
4ЭЦВ 10-63-110	ПЭДВ 32-219	32	63	110	2900	1720	235	233
1ЭЦВ 10-63-180	ПЭДВ 45-219	45	63	180	2900	2380	235	398
4ЭЦВ 10-63-270	ПЭДВ 65-219	65	63	270	2900	2950	235	420
1ЭЦВ 12-210-145	ПЭДВ 125-270	125	210	145	2900	3580	281	800

Таблица 25

Основные технические характеристики шестеренных насосных агрегатов типа НМШ и Ш

Марка насоса	Подача, м ³ /ч	Давление нагнетания, МПа (кг·с/см ²)	Частота вращения, об/мин	Мощность двигателя, кВт
НМШ 2-40-1,6/16 (Б)	1,6	1,6 (16)	1450	2,2
НМШ 5-25-2,5/6	2,5	0,6 (6)	960	2,2
НМШ 5-25-4,0/4 (Б)	4,0	0,4 (4)	1450	3,0
НМШ 5-25-4,0/10	4,0	1,0 (10)	1450	3,0
НМШ 5-25-4,0/25	4,0	2,5 (25)	1450	5,5
НМШ 8-25-6,3/2,5 (Б)	6,3	0,25 (2,5)	1450	2,2
НМШ 8-25-6,3/10	6,3	1,0 (10)	1450	4,0
НМШ 8-25-6,3/25	6,3	2,5 (25)	1450	7,5
Ш 40-4-19,5/4	19,5	0,4 (4)	980	7,5
Ш 40-4-19,5/6	19,5	0,6 (6)	980	7,0

Продолжение табл. 25

Марка насоса	Подача, м ³ /ч	Давление нагнетания, МПа (кг·с/см ²)	Частота вращения, об/мин	Мощность двигателя, кВт
Ш 80-2,5-37,5/2,5	37,5	0,25 (2,5)	980	15,0
НШ 32-32-2	3,33	14 (140)	1920	
НШ 50-42	5,1	14 (140)	1920	
НМШ 25Р	1,5	0,25 (2,5)	1200	
НМШ 25	1,9	1,6 (16)	1500	
НШ 10Е-2	1,1	14 (140)	1920	
НШ 6Е-3	0,6	16 (160)	1920	

Таблица 26

Технические характеристики доильных аппаратов

Показатели	АДУ-1			ДА-2М «Майга»	«Волга»
	Основное	03	09		
Рабочее вакуумметрическое давление, кПа	48	45	48	48	53
Частота пульсаций, мин ⁻¹	67±5	65±5	66±6	80±5	60±5
Частота вибропульсаций, мин ⁻¹	—	—	630±90	—	—
Соотношение тактов, %					
сосание	68	65	73	67	60
сжатие	32	35	27	33	10
отдых	—	—	—	—	30
Тип коллектора	Двухтактный				Трехтактный
Режим впуска воздуха в молочную камеру	непрерывный подсос	впуск на такте сжатия	впуск на такте сжатия	непрерывный подсос	впуск на такте сжатия
Объем молочной камеры, см ³	100	100	100	30	24
Расход воздуха аппаратом, м ³ /ч,	2,7	3,2	4,05	2,4	3,6
в т. ч. коллектором	0,3÷0,6	0,8÷1,3	0,8÷1,3	0,3	2,3
Вес подвесной части аппарата, Н	26,5	27,5	27,5	28,4	18

Таблица 27

Технические характеристики резервуаров-охладителей молока

Показатели	ТОМ-2А	SM-1250	МКА-2000Л-2А	МК-20Л/2
Вместимость резервуара, м ³	1,8	1,2	2	2
Номинальная температура охлаждения, °С	4÷5	4	3÷4	3÷4
Продолжительность охлаждения, ч	2,5	2,1	3÷4	До 4
Повышение температуры молока при хранении в течение 12 ч, °С	1÷2	1÷2	2÷3	3
Установленная мощность, кВт	9,93	2,57	5,4	4
Частота вращения мешалки, с ⁻¹	—	—	0,5	0,5
Мощность электродвигателя мешалки, кВт	0,18	0,37	0,25	—
Мощность электродвигателя молочного (промывочного) насоса, кВт	1,0	1,1	1,5	1,5
Габариты резервуара-охладителя, мм				
длина	4040	2860	4200	3190
ширина	1670	1090	2000	1830
высота	1710	1600	1500	800
Масса, кг	1830	750	650	375

Таблица 28

Технические характеристики электрокалориферных установок типа СФОЦ, исполнение И1

Показатель	СФОЦ-10/0,5Т	СФОЦ-16/0,5Т	СФОЦ-25/0,5Т	СФОЦ-40/0,5Т	СФОЦ-60/0,5Т	СФОЦ-100/0,5Т
Мощность, кВт,	9,85±1,0	15,75±1,5	23,25±2	46,5±5	69±7	94±9
в том числе электрокалорифера, кВт	9,6±1,0	15±1,5	22,5±2	45±5	67,5±5	90±9
Количество секций, шт.	2	2	3	3	3	3
Мощность секции, кВт	4,8±0,5	7,5±0,75	7,5±0,5	15±1,6	22,5±1,7	30±3
Количество ТЭНов, шт.	6	6	9	18	27	36
Подача воздуха, м ³ /с	0,22...0,33	0,44...0,77	0,44...0,77	0,66...1,2	0,9...1,6	1,25...2,5

Продолжение табл. 28

Показатель	СФОЦ-10/0,5Т	СФОЦ-16/0,5Т	СФОЦ-25/0,5Т	СФОЦ-40/0,5Т	СФОЦ-60/0,5Т	СФОЦ-100/0,5Т
Разность температур воздуха, °С	45...30	30...20	45...30	50...30	56...32	51...30
Аэродинамическое сопротивление сети, Па, не более	500	500	500	900	1000	1000

Таблица 29

Характеристики помещений

Вид помещения	Нормируемый объем помещения, м ³ /гол	Температура внутри помещения, °С	Удельная отопительная характеристика, Вт/(м ³ ·°С)	Удельная вентиляционная характеристика, Вт/(м ³ ·°С)
Коровник (коровы лактирующие)	15	10	0,95	1,047
Воловник (откорм КРС)	12	6	0,8	1,047
Телятник (от 1 до 3 месяцев)	10	12	0,85	1,396
Телятник (от 3 до 4 месяцев)	9	10	0,9	1,396
Свиноматочник (супоросные свиноматки)	15	12	0,85	1,280
Свиноматочник (подсосные свиноматки)	12	18	0,85	1,280
Свинарник (молодняк)	6	16	0,85	1,280
Свинарник (откорм)	8	16	0,7	1,280
Птичник (куры яичных пород)	0,5	6	0,75	1,396
Птичник (утки)	0,3	14	0,7	1,396
Цеха уоя животных	—	18	0,76	0,8
Жилые здания, гостиницы, общежития	—	18	0,76	*
Административные здания	—	18	0,5	0,1
Клубы	—	14	0,43	0,29
Магазины	—	15	0,44	*
Детские сады и ясли	—	20	0,44	0,13
Школы	—	16	0,45	0,1
Бани	—	25	0,33	1,16
Столовые	—	20	0,41	0,81
Ремонтные мастерские	—	20	0,70	0,23
Гаражи	—	10	0,7	*

* Не учитывается.

Таблица 30

**Выделения животными и птицей теплоты, водяных паров
и требуемый воздухообмен вентиляционных систем**

Вид и группа животных	Живая масса, кг	Полная теплота, Вт/гол	Водяные пары, г/(ч-гол)	Минимальный воздухообмен, м ³ /(ч-гол)
Коровы лактирующие (с удоем 10 л)	300	825	340	51
	400	978	404	68
	500	1100	455	85
Воля откормочные	400	1194	493	84
	600	1450	599	120
	800	1736	715	168
Телята в возрасте от 1 до 3 месяцев	60	275	113	11
	100	431	117	17
Телята в возрасте от 3 до 4 месяцев	90	317	131	16
	150	489	202	26
Свиноматки супоросные	100	389	139	23
	150	394	164	38
	200	450	180	50
Свиноматки подсосные с поросятами	100	678	282	35
	150	772	320	53
	200	894	370	70
Молодняк свиней	50	201	89	18
	80	300	124	27
	100	333	138	35
Свиньи откормочные	100	378	153	20
	200	489	202	42
Куры яичных пород	1,6	6,8	4,5	1,6÷3
Утки	1,5	7,9	5,7	3,5÷7

Таблица 31

**Технические данные двигателей серии DRS
фирмы SEW EURODRIVE. Синхронная частота
вращения 1500 об/мин (стандарт)**

Тип двигателей	P_n , кВт	n_n , об/мин	η_n , %	$\cos \varphi$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{ср}}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$	Момент инерции, кг·м ²	Масса, кг
DRS71M4	0,55	1380	70,6	0,72	2,1	2,1	3,6	0,0071	9,1
DRS80S4	0,75	1400	75,7	0,81	1,9	1,9	4,3	0,00149	11,5
DRS80M4	1,1	1410	79,5	0,83	2,2	1,7	5,1	0,00215	14,3
DRS90M4	1,5	1395	80,2	0,82	2,3	2,0	5,0	0,00355	18,4
DRS90L4	2,2	1400	81,3	0,81	2,5	2,2	5,1	0,00435	21,5
DRS100M4	3,0	1400	82,7	0,82	2,8	2,4	5,3	0,0056	26
DRS112M4	4,0	1435	86,9	0,84	2	1,7	6,0	0,0146	42
DRS132S4	5,5	1445	87,8	0,81	2,4	2,1	6,7	0,0190	44
DRS132M4	7,5	1445	88,8	0,85	2,4	1,9	6,6	0,0255	59
DRS160M4	11	1460	90,4	0,80	2,3	2,3	6,6	0,045	81
DRS160S4	15	1460	90,1	0,81	2,1	1,8	5,5	0,090	122
DRS180M4	18,5	1460	90,7	0,82	2,2	1,9	6,0	0,111	141
DRS180L4	22	1470	91,6	0,83	2,1	1,8	6,0	0,130	161
DRS200L4	30	1475	92,9	0,82	2,2	2,0	7,0	0,236	260
DRS225S4	37	1470	92,5	0,84	2,2	1,8	7,0	0,293	295
DRS225M4	45	1480	93,4	0,8	2,8	2,0	8,2	0,343	315
DRS225MC4	55	1480	93,4	0,81	2,3	1,6	7,3	0,433	330
DRS315K4	110	1482	94,5	0,84	2,2	1,7	6,4	1,84	850
DRS315S4	132	1484	94,5	0,84	2,3	1,8	6,4	2,25	930
DRS315M4	160	1483	95,1	0,87	2,1	1,7	7,3	2,79	1090
DRS315L4	200	1481	95,2	0,88	2,1	1,7	6,7	3,19	1170

Таблица 32

**Технические данные двигателей серии DRP
фирмы SEW EURODRIVE. Синхронная частота вращения
1500 об/мин (энергоэффективные — PREMIUM)**

Тип двигателя	P_n , кВт	n_n , об/мин	η_n , %	$\cos \varphi$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{cp}}{M_n}$	$\frac{I_n}{I_n}$	Момент инерции, кг·м ²	Масса, кг
DRP90M4	0,75	1450	84	0,72	3,7	3,1	7,3	0,00355	15,9
DRP90L4	1,1	1440	85,3	0,78	3,2	2,7	6,8	0,00435	18,9
DRP100M4	1,5	1440	86,6	0,79	3,6	3,1	7,4	0,0056	23,5
DRP100L4	2,2	1440	87,5	0,77	4,1	3,2	7,7	0,0068	23,6
DRP112M4	3	1455	93,4	0,82	2,4	2,0	7,3	0,0146	42
DRP132M4	4	1465	89,7	0,84	2,9	2,0	8,9	0,0255	59
DRP160S4	5,5	1475	91,2	0,80	3,0	2,2	8,6	0,0370	74
DRP160M4	7,5	1470	91,3	0,82	2,8	2,2	8,2	0,045	81
DRP180M4	11,0	1470	91,6	0,83	2,9	2,6	7,7	0,111	139
DRP180L4	15	1470	92,1	0,84	2,5	2,2	6,9	0,130	161
DRP200L4	18,5	1480	93,4	0,83	2,6	2,0	8,2	0,236	260
DRP225S4	22	1480	92,8	0,84	2,7	2,1	7,9	0,293	290
DRP225M4	30	1480	93,4	0,84	2,9	2,1	8,2	0,343	315
DRP225MC4	37	1485	93,9	0,83	2,7	1,8	8,3	0,433	330
DRP315K4	90	1484	95,2	0,86	2,3	1,9	7,2	1,84	850
DRP315S4	110	1486	95,7	0,87	2,3	1,8	6,7	2,25	930
DRP315M4	132	1488	95,8	0,87	2,5	2	8,2	2,79	1090
DRP315L4	160	1488	96,1	0,88	2,8	2,2	8,2	3,19	117,0

**СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ СИ
И ДРУГИМИ ЕДИНИЦАМИ**

Длина, скорость:

- ангстрем (Å) = $1 \cdot 10^{-10}$ м;
- микрон (мк, μ) = 10^{-6} м (микрометр);
- фут = 12 дюймов = 0,3048 м;
- миля морская = 1852 м;
- узел = морская миля в час = 1,852 км/ч = 0,514 м/с.

Объем, вместимость, расход:

- литр (л) = $\text{Дм}^3 = 10^{-3} \text{ м}^3$;
- галлон = 8 пинт = 4,546 л;
- бушель = 8 галлонов = 36,369 л;
- баррель нефтяной = 158,957 л;
- кубический метр в час ($\text{м}^3/\text{ч}$) = $2,7(7) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

Масса:

- центнер (ц) = 100 кг;
- тонна (т) = 1000 кг;
- карат (кар) = 0,2 г;
- унция = 28,350 г;
- фунт английский = 16 унций = 453,592 г.

Сила, давление:

- килограмм-сила = 9,80665 Н;
- атмосфера техническая (ат) = $1 \text{ кг} \cdot \text{с}/\text{см}^2 = 9,806 \cdot 10^4 \text{ Па}$;
- атмосфера физическая (атм) = 760 мм рт. ст. = $1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} \cong 10 \text{ м вод. ст.}$;
- миллиметр водяного столба = $\text{кг} \cdot \text{с}/\text{м}^2 \cong 10 \text{ Па}$;
- миллиметр ртутного столба = 133,322 Па;
- бар (бар) = 10^5 Па .

Мощность, энергия:

- лошадиная сила = 735,5 Вт;
- калория в секунду (кал/с) = 4,1868 Вт;
- килокалория в час (ккал/ч) = 1,163 Вт;
- киловатт·час (кВт·ч) = $3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$;
- электрон-вольт (ЭВ) = $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$;
- калория (кал) = 4,186 Дж;
- калория большая (ккал) = 4186,6 Дж;
- гигакалория (Гкал) = $10^9 \text{ кал} = 4,186 \cdot 10^9 \text{ Дж} = 1,16 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев, В. П.* Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. — М.; Л. : Госэнергоиздат, 1963. — 772 с.
2. *Чиликин, М. Г.* Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. — М. : Энергоатомиздат, 1981. — 576 с.
3. *Москаленко, В. В.* Автоматизированный электропривод. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 416 с.
4. *Ковчин, С. А.* Теория электропривода / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. — СПб. : Энергоатомиздат, 1994. — 496 с.
5. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 616 с.
6. *Нейман, Л. Р.* Теоретические основы электротехники : в 2 т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. — М., Л. : Энергия, 1966. — 415 с.
7. *Ключев, В. И.* Теория электропривода. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 704 с.
8. *Москаленко, В. В.* Системы автоматизированного управления электропривода. — М. : ИНФРА-М, 2007. — 208 с.
9. *Булгаков, А. А.* Частотное управление асинхронными электродвигателями. — М. : Академия наук СССР, 1955. — 216 с.
10. Энергосберегающий асинхронный электропривод / под ред. И. Я. Браславского. — М. : АСАДЕМА, 2004. — 248 с.
11. *Белов, М. П.* Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. — М. : АСАДЕМА, 2004. — 576 с.
12. *Чехет, Э. М.* Регулируемый электропривод переменного тока как эффективнейшее средство энерго- и ресурсосбережения // Техн. электродинамика. — Киев, 1997. — № 1. — С. 25–30.
13. *Онищенко, Г. Б.* Электрический привод. — М. : АСАДЕМА, 2006. — 288 с.

14. Беспалов, В. Я. Импульсные перенапряжения в обмотках асинхронных двигателей при питании от ШИМ-преобразователя / В. Я. Беспалов, К. Н. Зверев // Электротехника. — 1999. — № 9. — С. 17–21.
15. Флоренцев, С. Н. Современная элементная база силовой электроники / С. Н. Флоренцев, Ф. И. Ковалев // Электротехника. — 1996. — № 4. — С. 2–8.
16. Лезнов, Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод насосных и водопроводных установок. — М. : Энергоатомиздат, 2006. — 350 с.
17. Сандлер, А. С. Частотное управление асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Д. С. Сарбатов. — М. : Энергия, 1974. — 328 с.
18. Епифанов, А. П. Электромеханические преобразователи энергии. — СПб. : Лань, 2004. — 208 с.
19. Костенко, М. П. Электрические машины : в 2 т. / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. — Л. : Энергия, 1973.
20. Вольдек, А. И. Электрические машины. — М.; Л. : Энергия, 1966. — 782 с.
21. Важнов, А. И. Электрические машины. — Л. : Энергия, 1969. — 710 с.
22. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / под ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. — М. : Энергоатомиздат, 1989.
23. Асинхронные двигатели серии 4А : справ. / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. — М. : Энергоатомиздат, 1982.
24. Асинхронные двигатели общего назначения / под ред. В. М. Петрова, А. Э. Кравчика. — М. : Энергия, 1980. — 488 с.
25. Осин, И. Л. Электрические машины (синхронные машины) / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян. — М. : Высш. шк., 1990.
26. Епифанов, А. П. Электрические машины. — СПб. : Лань, 2006. — 264 с.
27. Веселовский О. Н. Линейные асинхронные двигатели / О. Н. Веселовский, Ю. А. Коняев, Ф. Н. Сарапулов. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 232 с.
28. Ямамура, С. Теория линейных асинхронных двигателей. — Л. : Энергоатомиздат, 1983. — 252 с.
29. Епифанов, А. П. Основные вопросы проектирования тяговых линейных асинхронных двигателей // Электротехника. — 1992. — № 1, 5, 10.
30. Аипов, Р. С. Линейные электрические машины и приводы на их основе. — Уфа : Изд-во БГАУ, 2003. — 110 с.
31. Аракелян, А. К. Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором / А. К. Аракелян,

- А. А. Афанасьев, М. Г. Чиликин. — М. : Энергия, 1977. — 224 с.
32. *Винокуров, В. А.* Электрические машины железнодорожного транспорта / В. А. Винокуров, Д. А. Попов. — М. : Транспорт, 1986. — 520 с.
33. *Яворский, Б. М.* Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — М. : Наука, 1981.
34. *Бронштейн, И. Н.* Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — М. : Наука, 1965. — 612 с.
35. *Котеленец, Н. Ф.* Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. А. Акимова, М. В. Антонов. — М. : АСАДЕМА, 2003. — 384 с.
36. *Чунихин, А. А.* Электрические аппараты. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 720 с.
37. Системы плавного пуска : учебн. пособие / Фирма АВВ, 2003. — 230 с.
38. Проектирование приводов EURODRIVE (SEW). Практика приводной техники, 2001, 2002, 2003.
39. EURODRIVE (SEW). Преобразователи частоты MOVITRAC 07. Системное руководство, 2001. — 58 с.
40. *Быстрицкий, Г. Ф.* Основы энергетики. — М. : ИНФРА-М, 2005. — 278 с.
41. *Ряшенцев, Н. П.* Электропривод с линейными электромагнитными двигателями. — Новосибирск : Наука, 1981. — 146 с.
42. *Алиев, И. И.* Справочник по электротехнике и электрооборудованию. — Ростов н/Д : Феникс, 2004. — 478 с.
43. *Сидельников, Б. В.* Вентильные двигатели с магнитоэлектрическим возбуждением / Б. В. Сидельников, Г. С. Рогачевская // Проблемы созданная и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. — 2001. — Вып. 3. — С. 55–66.
44. *Егоров, А. А.* Оптимизация режима конденсаторного питания линейного электромагнитного двигателя в приводе ударных машин / А. А. Егоров, Г. Г. Угаров // Вестник СГТУ. — 2006. — № 3(15). — С. 78–83.
45. *Фоменков, А. П.* Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий. — М. : Колос, 1984. — 288 с.
46. *Мельников, С. В.* Механизация и автоматизация животноводческих ферм. — М. : Колос, 1978.
47. *Бодин, А. П.* Электрооборудование для сельского хозяйства / А. П. Бодин, Ф. И. Московкин. — М. : Россельхозиздат, 1981. — 302 с.
48. *Вагин, Б. И.* Лабораторный практикум по механизации и технологии животноводства / Б. И. Вагин, А. И. Чугунов,

- Ю. А. Мирзоянц. — В. Луки : ГУП «Великолукская городская типография», 2003. — 534 с.
49. *Яуре, А. Г.* Крановый электропривод / А. Г. Яуре, Е. М. Певзнер. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 344 с.
 50. *Ерошенко, Г. П.* Эксплуатация электрооборудования / Г. П. Ерошенко, А. П. Коломиец, Н. П. Кондратьев. — М. : Колос, 2005. — 344 с.
 51. *Цупак, А. В.* Электропривод сельскохозяйственных насосов, вентиляторов, центрифуг. — СПб. : СПбГАУ, 1992–1996.
 52. *Черкасский, В. М.* Насосы, вентиляторы, компрессоры. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 416 с.
 53. *Епифанов, А. П.* Основы электропривода. — СПб. : Лань, 2008. — 198 с.
 54. *Епифанов, А. П.* Электропривод в сельском хозяйстве / А. П. Епифанов, А. Г. Гущинский, Л. М. Малайчук. — СПб. : Лань, 2010. — 220 с.
 55. Электромагнитная совместимость. EURODRIVE (SEW). Практика приводной техники. — СПб, 2003. — 91 с.
 56. Электродвигатели асинхронные DRS/DRE/DRP. EURODRIVE (SEW). — СПб., 2007. — 105 с.
 57. *Усанов, К. М.* Линейный импульсный электропривод машин с автономным питанием / К. М. Усанов, В. И. Мошкин, Г. Г. Угаров. — Курган : Курганский ун-т. — 283 с.
 58. *Горбачев, Г. Н.* Промышленная электроника / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 320 с.
 59. *Епифанов, А. П.* Монорельсовый внутренний транспорт животноводческих комплексов и тепличных хозяйств с линейным асинхронным электроприводом / А. П. Епифанов, Л. М. Малайчук, Ю. А. Самсонов // Известия СПбГАУ. — СПб. — 2010. — № 18. — С. 235–242.
 60. Гидравлические агрегаты тракторов и сельскохозяйственных машин : кат. ЦНИИТЭИ. — М., 1977. — 340 с.
 61. Автоматизация производства и промышленная электроника. Энциклопедия современной техники : в 4 т. / гл. ред. А. И. Берг, В. А. Трапезников. — М. : Сов. энцикл., 1965.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Введение	7
1. Общие сведения	
об автоматизированном электроприводе	11
1.1. Назначение и структура автоматизированного электропривода	11
1.2. Классификация электроприводов	15
1.3. Регулирование координат и принципы управления электроприводами	19
1.4. Регуляторы, датчики	25
2. Механика электропривода	33
2.1. Основные соотношения механики	33
2.2. Приведение моментов и сил сопротивления, инерционных масс и моментов инерции	36
2.3. Уравнение движения электропривода и режимы работы	40
2.4. Приводные характеристики машин и механизмов .	44
2.5. Механические характеристики электродвигателей. Совместная работа двигателя и производственного механизма	47
3. Электроприводы с двигателями постоянного тока	52
3.1. Общие сведения о двигателях постоянного тока. Область применения	52
3.2. Механические характеристики двигателей постоянного тока в различных режимах работы ...	55
3.3. Регулирование скорости, тока и момента	63
3.3.1. Регулирование с помощью резисторов в цепи якоря	63
3.3.2. Регулирование скорости двигателей постоянного тока изменением магнитного потока	67
3.4. Регулирование скорости двигателей постоянного тока изменением напряжения, подводимого к якорю	70

3.4.1. Электропривод по системе «генератор — двигатель»	72
3.4.2. Электропривод по системе «управляемый выпрямитель — двигатель»	74
3.4.3. Электропривод по системе «широтно-импульсный преобразователь — двигатель»	80
3.5. Автоматическое регулирование скорости электроприводов постоянного тока	83
4. Электроприводы с асинхронными двигателями	92
4.1. Общие сведения	92
4.2. Схема замещения и основные соотношения для асинхронных двигателей	96
4.3. Режимы работы и механические характеристики асинхронных двигателей	101
4.4. Пуск и торможение асинхронных двигателей ...	110
4.5. Регулирование скорости асинхронных двигателей ..	118
4.5.1. Регулирование скорости изменением жесткости характеристики	118
4.6. Регулирование скорости переключением числа пар полюсов	122
4.7. Частотное регулирование угловой скорости асинхронных двигателей	124
4.8. Преобразователи частоты	130
4.9. Вопросы электромагнитной совместимости в приводах по системе «преобразователь — двигатель»	136
5. Электроприводы с синхронными, вентильными и линейными электродвигателями	141
5.1. Электропривод с синхронными двигателями	141
5.1.1. Синхронные двигатели: устройство, основные характеристики, области применения	141
5.1.2. Регулирование реактивной мощности синхронных двигателей	146
5.1.3. Управление синхронными электроприводами	148
5.2. Электроприводы с вентильными двигателями ...	153
5.3. Электроприводы с линейными асинхронными электродвигателями	161
5.4. Электроприводы с линейными синхронными двигателями	166
5.5. Электроприводы с линейными электромагнитными двигателями	168
6. Энергетика электроприводов	175
6.1. Энергетика нерегулируемых электроприводов в установившихся режимах	176
6.2. Энергетика регулируемых электроприводов в установившихся режимах	181

6.3. Энергетические показатели электроприводов постоянного тока в динамических режимах	187
6.3.1. Потери энергии электроприводов постоянного тока в динамических режимах	192
6.4. Энергетика электроприводов с асинхронными двигателями в динамических режимах	196
6.4.1. Потери энергии асинхронных электроприводов в динамических режимах	198
6.5. Снижение потерь в динамических режимах	200
7. Выбор электродвигателя по мощности	206
7.1. Общие положения по выбору двигателя	206
7.2. Нагревание и охлаждение двигателей. Классификация режимов работы	211
7.3. Проверка двигателей для продолжительного режима работы	217
7.4. Проверка двигателей, работающих в кратковременном режиме работы	221
7.5. Проверка двигателей для повторно-кратковременного режима работы	226
7.6. Допустимая частота включений асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	229
8. Характеристики машин и механизмов	233
8.1. Классификация машин по приводным характеристикам	233
8.2. Особенности режимов и условий работы электрифицированных агрегатов сельскохозяйственного производства	237
8.3. Особенности выбора электродвигателей для машин сельскохозяйственного назначения	239
9. Электропривод центрифуг	241
9.1. Особенности приводных характеристик центрифуг	241
9.2. Типы электроприводов центрифуг	244
9.3. Определение мощности двигателя	248
9.4. Экспериментальные исследования потерь в пусковых режимах асинхронного электропривода центрифуги	252
10. Электропривод центробежных насосов и вентиляторов	254
10.1. Общие сведения. Приводные характеристики турбомеханизмов	254
10.2. Регулирование подачи турбомеханизма	262
10.3. Выбор мощности электродвигателя для приводов насосов и вентиляторов	268
10.4. Стабилизация напора в системе водоснабжения	273

11. Электропривод транспортеров	278
11.1. Классификация транспортеров по назначению и приводным характеристикам	278
11.2. Расчет статических нагрузок и мощности электродвигателя	281
11.3. Особенности выбора электроприводов к приводным станциям транспортеров	288
11.4. Пример расчета привода ленточного транспортера	289
12. Электропривод крановых механизмов	292
12.1. Устройство, режимы работы, характеристики: общие положения	292
12.2. Нагрузки крановых механизмов	297
12.3. Выбор электродвигателей крановых механизмов .	300
12.4. Расчет и выбор пускорегулировочных резисторов	306
12.5. Типовые схемы электроприводов крановых механизмов	308
12.6. Частотно-регулируемый электропривод крановых механизмов	314
13. Электропривод машин с кривошипно-шатунным механизмом	318
13.1. Общие положения	318
13.2. Приводные характеристики сельскохозяйственных машин с кривошипно-шатунным механизмом	319
13.3. Выбор элементов маховикового электропривода . .	324
13.3.1. Нагрузочная характеристика электродвигателя	326
13.3.2. Выбор электродвигателя по мощности	328
13.3.3. Определение момента инерции маховика . .	329
13.4. Электропривод пилорам	331
14. Электропривод машин для приготовления и раздачи кормов на фермах. Внутренний транспорт тепличных хозяйств	334
14.1. Кормоприготовительные машины. Общие положения	334
14.2. Приводные характеристики	339
14.3. Требования к электроприводу и задачи управления кормоприготовительными машинами .	342
14.4. Выбор электродвигателя по мощности	343
14.5. Технические характеристики некоторых кормоприготовительных машин	346
14.6. Внутренний транспорт животноводческих ферм и тепличных хозяйств	347
14.7. Компоночная схема и характеристики линейного асинхронного электропривода	352
Приложение	359
Литература	385

*Алексей Павлович ЕПИФАНОВ
Людмила Михайловна МАЛАЙЧУК
Александр Геннадьевич ГУЩИНСКИЙ*

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Учебник

Под редакцией *А. П. ЕПИФАНОВА*

Зав. редакцией
инженерно-технической литературы *Е. Л. Дубова*
Ответственный редактор *Е. А. Мармылева*
Художественный редактор *С. Ю. Малахов*
Редактор *А. О. Брезман*
Технический редактор *Е. С. Жукович*
Корректоры *Т. А. Кошелева, И. Е. Вильман*
Подготовка иллюстраций *Н. А. Платонова*
Выпускающие *Т. А. Столбова, Е. П. Королькова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5.
Тел./факс: (812) 412-29-35, 412-05-97, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 04.06.12.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108^{1/32}.
Печать офсетная. Усл. п. л. 21,00. Тираж 1000 экз.

Заказ № .

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленных диапозитивов
в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Правда Севера» .
163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, д. 32.
Тел./факс (8182) 64-14-54; www.ippps.ru

ГДЕ КУПИТЬ

ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:

Для того, чтобы заказать необходимые Вам книги,
достаточно обратиться в любую из торговых компаний
Издательского Дома «ЛАНЬ»:

по России и зарубежью

«ЛАНЬ-ТРЕЙД»

192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13

тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82

тел./факс: (812) 412-54-93

e-mail: trade@lanbook.ru

ICQ: 446-869-967

www.lanpbl.spb.ru/price.htm

в Москве и в Московской области

«ЛАНЬ-ПРЕСС»

109263, Москва, 7-ая ул. Текстильщиков, д. 6/19

тел.: (499) 178-65-85

e-mail: lanpress@lanbook.ru

в Краснодаре и в Краснодарском крае

«ЛАНЬ-ЮГ»

350072, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1

тел.: (861) 274-10-35

e-mail: lankrd98@mail.ru

ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:

интернет-магазины:

Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>

«Сова»: <http://www.symplex.ru>

«Ozon.ru»: <http://www.ozon.ru>

«Библион»: <http://www.biblion.ru>

Издательство
«ЛАНЬ» 

**ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНАЯ
ЛИТЕРАТУРА
ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ**

Мы издаем новые
и ставшие классическими учебники
и учебные пособия по общим
и общепрофессиональным
направлениям подготовки.

Большая часть литературы
издательства «ЛАНЬ»
рекомендована Министерством образования
и науки РФ и используется вузами
в качестве обязательной.

Мы активно сотрудничаем
с представителями высшей школы,
научно-методическими советами
Министерства образования и науки РФ,
УМО по различным направлениям
и специальностям по вопросам грифования,
рецензирования учебной литературы
и формирования перспективных планов издательства.

Наши адреса и телефоны:

РФ, 192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5
(812) 412-29-35, 412-05-97, 412-92-72, 336-25-09

www.lanbook.com

Издательство
«ЛАНЬ»  ЛАНЬ®

Мы будем благодарны Вам
за пожелания по издаваемой нами литературе,
а также за предложения по изданию книг
новых авторов или переизданию
уже существующих трудов.

Мы заинтересованы в сотрудничестве
с высшими учебными заведениями
и открыты для Ваших предложений
по улучшению нашего взаимодействия.

Теперь Вы можете звонить нам бесплатно
из любых городов России по телефону

8-800-700-40-71

Дополнительную информацию
и ответы на вопросы Вы также можете получить,
обратившись по электронной почте:

market@lanbook.ru

Издательство 
«ЛАНЬ» ЛАНЬ®

**ПРЕДСТАВЛЯЕМ
НОВЫЕ УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ**

Ю. М. ФРОЛОВ, В. П. ШЕЛЯКИН

**СБОРНИК ЗАДАЧ
И ПРИМЕРОВ РЕШЕНИЙ
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ПРИВОДУ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Учебное пособие представляет собой сборник задач, примеров их решения и анализа режимов работы электрического привода. К каждой теме приведены краткие теоретические сведения, относящиеся к рассматриваемым вопросам электропривода. Примеры решений иллюстрированы графиками и пояснениями, способствующими более глубокому усвоению теоретического материала курса «Электропривод» и приобретению навыков его практического применения.

Данное пособие составлено в соответствии с программой курса «Электропривод» для студентов, обучающихся по направлению «Агроинженерия», профилю «Электроснабжение и автоматизация технических процессов сельского хозяйства», а также может быть полезно для студентов электротехнических направлений, изучающих электрический привод.

ПРЕДСТАВЛЯЕМ
НОВЫЕ УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ

М. А. ЮНДИН

ТОКОВАЯ ЗАЩИТА
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Рассматриваются условия выбора, методы расчета установок срабатывания токовой защиты электрооборудования, а также проверки выбранных аппаратов защиты.

Приводятся примеры расчета токовой защиты различного назначения в электроустановках до 1000 В и свыше 1000 В, подробные справочные данные на токовые аппараты защиты, как прошлых лет выпуска, так и современных, выпуск которых освоен отечественной промышленностью в последнее десятилетие.

Учебное пособие предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», а также бакалавров по профилю «Электротехнологии и электрооборудование» направления подготовки «Агроинженерия».

Большой объем справочной информации может быть полезен инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием и эксплуатацией электрооборудования.

Издательство
«ЛАНЬ»  ЛАНЬ®

ПРЕДСТАВЛЯЕМ
НОВЫЕ УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.
ИНТЕРНЕТ-ТЕСТИРОВАНИЕ
БАЗОВЫХ ЗНАНИЙ**

ПОД РЕД. П. А. БУТЫРИНА, Н. В. КОРОВКИНА
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Учебное пособие содержит теоретические сведения и набор стандартных задач по теоретической электротехнике, а также подробные решения демонстрационных вариантов тестовых заданий, представленных на сайте Росаккредагентства (www.fero.ru). Тематическая структура пособия определяется дидактическими единицами Государственных образовательных стандартов, которые, в свою очередь, разделяются на более узкие подразделы — так называемые аттестационные измерительные материалы (АПИМ).

Пособие предназначено для подготовки студентов высших учебных заведений к интернет-тестированию по дисциплине «Теоретические основы электротехники», которое проводится в рамках ежегодного мониторинга учреждений высшего профессионального образования для оценки качества проведения учебного процесса.

Издательство
«ЛАНЬ» 
ЛАНЬ®

ПРЕДСТАВЛЯЕМ
НОВЫЕ УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ

СПРАВОЧНИК ПО ОСНОВАМ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ Ю. А. БЫЧКОВА, В. М. ЗОЛОТНИЦКОГО,
Е. Б. СОЛОВЬЕВОЙ, Э. П. ЧЕРНЫШЕВА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Содержание справочника соответствует программе курсов «Теоретические основы электротехники» и «Теория электрических цепей». Пособие содержит тематический указатель, алфавитный каталог-словарь основных понятий, законов и терминов теоретической электротехники, а также каталог типовых расчетов и ответов на основные контрольные вопросы при изучении теории электрических цепей.

Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения по техническим направлениям, а также для специалистов различных областей науки и техники.