

Министерство образования Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных
установок и технологических комплексов»

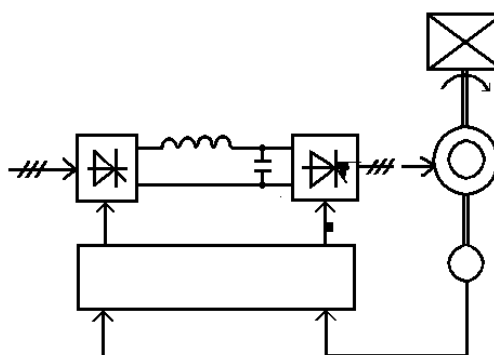
С. Н. Павлович, Н.М. Улащик

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ

Курс лекций

для студентов ФГДЭ специальности

1- 51 02 01- “Разработка месторождений полезных ископаемых”



Минск 2017

УДК 621.34-52 (075.8)

ББК 31.291я7

П 12

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Б. И. Фираго;

кандидат технических наук, доцент В. П. Беляев

Павлович, С.Н.

Электропривод и электроснабжение горных предприятий: курс лекций для студентов ФГДЭ специальности 1- 51 02 01- “Разработка месторождений полезных ископаемых” / С. Н. Павлович, Н.М. Улащик.

– Минск: БНТУ, 2017. – 155 с.

Рассматриваются основные вопросы теории и практики автоматизированного электропривода современных горных предприятий: механика электропривода, электромеханические свойства электродвигателей постоянного и переменного тока, электрические аппараты и схемы управления электроприводами. Дается расчет мощности и приводятся рекомендации по выбору двигателей при различных режимах эксплуатации в технологическом процессе горных предприятий. Излагаются общие вопросы электробезопасности. Рассмотрены вопросы электроснабжения горных предприятий.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь

Тел.(017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37

E-mail: emd@bntu.by

Регистрационный № БНТУ/ФИТР46-5.2017

© Павлович С.Н., Улащик Н.М., 2017

© БНТУ, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. ВВЕДЕНИЕ	5
Тема 2. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА	12
2.1. Виды передаточных механизмов	12
2.2. Кинематические схемы электроприводов	14
2.3. Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей	15
2.4. Расчетные схемы механической части электропривода	19
2.5. Уравнение вращательного движения электропривода	23
Тема 3. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	27
3.1. Регулирование скорости. Показатели качества регулирования скорости электродвигателей	27
3.2. Регулирование момента и тока	29
3.3. Регулирование положения	31
3.4. Структуры электропривода, применяемые при регулировании координат .	32
Тема 4. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	35
4.1. Общие сведения	35
4.2. Механические характеристики электродвигателей переменного тока	36
4.3. Механические характеристики электродвигателей постоянного тока	49
Тема 5. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	57
5.1. Критерии выбора электродвигателей. Основные режимы работы электродвигателей по нагреву	57
5.2. Построение нагрузочных диаграмм механизма и электропривода. Методы расчета мощности электродвигателей	63
5.3. Расчет номинальной мощности электродвигателя при длительном режиме работы	69
5.4. Расчет номинальной мощности электродвигателя при повторно- кратковременном и кратковременном режимах работы	70
Тема 6. РАЗОМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ	73
6.1. Электрические аппараты ручного и дистанционного управления	73
6.2. Датчики времени, скорости, тока и положения	79
6.3. Виды и аппараты защиты, блокировок и сигнализации в ЭП	84
6.4. Защита от перенапряжений на ОВ	88
6.5. Электрические блокировки в системах ЭП	88
6.6. Сигнализация в схемах управления ЭП	88
Тема 7. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ	90
7.1. Типовая схема пуска ДПТ НВ в функции времени	90
7.2. Типовая схема пуска двигателя постоянного тока в две ступени в функции ЭДС и динамического торможении в функции времени	91

7.3. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с АД.....	92
7.4. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с синхронными двигателями	96
7.5. Выбор аппаратов коммутации, управления и защиты	97
Тема 8. ЗАМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ	100
8.1. Схемы замкнутых структур электропривода	100
8.2. Технические средства замкнутых схем управления электропривода	103
8.3. Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями постоянного тока	105
8.4. Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями переменного тока	112
Тема 9. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ГОРНЫХ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ	115
9.1. Общие сведения	115
9.2. Классификация и особенности исполнения рудничного электрооборудования.....	117
9.3. Области применения рудничного электрооборудования	119
9.4. Рудничные электродвигатели	120
9.5. Рудничные магнитные пускатели и станции управления.....	121
9.6. Реле контроля содержания метана в рудничной атмосфере	123
9.7. Рудничные аппараты напряжением выше 1000 В	126
Тема 10. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	127
10.1. Общие сведения	127
10.2. Характеристики потребителей и приемников ЭЭ	127
10.3. Категории электроприемников и обеспечение надежности	128
10.4. Характерные схемы питающих и распределительных сетей	129
10.5. Электрические сети и их расчет	134
Тема 11. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	141
11.1. Воздействия электрического тока на человека	141
11.2. Системы электропитания потребителей в шахте	143
11.3. Основные мероприятия по повышению электробезопасности	145
11.4. Особенности схем дистанционного управления шахтными передвижными механизмами	150
11.5. Средства защиты работающих в электроустановках	153
ЛИТЕРАТУРА	155

Тема 1. ВВЕДЕНИЕ

Цель вводной лекции: рассмотреть цель и задачи изучения дисциплины; основные понятия и их определения, структурную схему автоматизированного электропривода, классификацию электроприводов, краткий исторический обзор и основные этапы развития электропривода.

Цель и задачи изучения дисциплины «Электропривод и электроснабжение горных предприятий». Производственные показатели современных горных машин и электрооборудования горных предприятий, используемых при производстве горных работ, во многом определяются степенью их автоматизации на основе электродвигателей, систем автоматического управления и систем электроавтоматики. **Целью** изучения дисциплины является формирование у студентов знаний по электрооборудованию и автоматизированным электроприводам, применяемым в современных горных предприятиях, а также приобретение знаний об электроснабжении и электрических сетях горных предприятий.

Основными **задачами** дисциплины являются **изучение:** электромеханических свойств электродвигателей постоянного и переменного тока; методов расчета и выбора электродвигателей; аппаратов и систем управления автоматизированными электроприводами горных предприятий, а также общих вопросов электробезопасности и электроснабжения горных предприятий.

В результате освоения дисциплины «Автоматизированный электропривод и электроснабжение горных предприятий» студент должен

знать:

- устройство, принцип действия и электромеханические свойства электродвигателей постоянного и переменного тока;
- способы пуска, торможения и регулирования скорости электродвигателей постоянного и переменного тока;
- контактную и бесконтактную аппаратуру, применяемую в схемах управления автоматизированными электроприводами;
- методы расчёта номинальной мощности электродвигателей;
- основные мероприятия по повышению электробезопасности;
- общие вопросы по электроснабжению горных предприятий;

уметь:

- рассчитывать приведенные к валу электродвигателя моменты и силы сопротивления, моменты инерции и массы движущихся частей электроприводов; механические характеристики электродвигателей постоянного и переменного тока;
- читать типовые электрические схемы релейно-контакторного управления электродвигателями постоянного и переменного тока;
- рассчитывать пусковые сопротивления для электродвигателей.

Основные понятия и их определения. Эффективность производства в значительной степени определяется способом получения *энергии*, необходимой для выполнения механической работы в производственных процессах. Создание в качестве двигателя *паровой машины* (взамен гидравлического двигателя)

в XIX в. послужило мощным толчком развития промышленного производства (*поэтому XIX век назван веком пара*). В XX веке основным источником механической энергии стал более совершенный электрический двигатель, а основным видом привода рабочих машин в промышленном производстве – электрический привод (*поэтому XX век назван веком электричества*).

В настоящее время почти 100 % электрической энергии производится с помощью электрических машин (генераторов) и до 90 % ее потребляют также электрические машины (двигатели), которые преобразуют электрическую энергию в механическую. Кроме электрической используются другие виды энергии и двигатели на их основе: паровая турбина (в пароходах), паровая машина (в паровозах), двигатель внутреннего сгорания (в автомобилях).

Современное промышленное производство характеризуется большим многообразием технологических процессов с применением различных производственных машин и механизмов (металлорежущих станков, прессов, прокатных станов, конвейеров, подъемных кранов, насосов, вентиляторов и др.). *Производственный механизм* (или *рабочая машина*) состоит из множества взаимосвязанных узлов, один (или более) из которых выполняет заданную технологическую операцию. Поэтому такой узел называется **исполнительным органом (ИО)**. Для многих рабочих машин характерным является наличие не одного, а двух или даже нескольких взаимодействующих исполнительных органов. Например, при обработке детали на токарном станке она приводится во вращение вокруг своей оси, а резец при этом перемещается вдоль детали и снимает с нее слой металла (стружку). Вращение детали осуществляет шпиндель станка (это первый исполнительный орган), а механизм подачи станка (это уже второй исполнительный орган) поступательно перемещает резец. Таким образом, оба исполнительных органа, совершая механические движения (вращение детали и перемещение резца), выполняют заданную технологическую операцию. При обработке материалов и изделий на станках, прокатных станах, прессах исполнительными органами являются шпиндели, механизмы подачи, суппорты, валы, штампы и т.д. Перемещение твердых материалов, изделий, газов, жидкостей производится конвейерами, подъемными кранами, лифтами, насосами, вентиляторами, компрессорами.

Что же понимается под словом «*привод*»? К. Маркс в I т. «Капитала» написал, что «всякое развитое машинное устройство состоит из трех существенно различных частей: машины-двигателя, передаточного механизма, наконец, машины орудия или рабочей машины».

Назначение первых двух частей – привести в движение (вращательное или поступательное) *исполнительный орган* рабочей машины. Эти части объединяют общим названием «*привод*». Таким образом, *приводом* называют машинное устройство, сообщающее движение *исполнительному органу* производственной машины и состоящее из двигателя и механических передач.

Многие исполнительные органы (шпиндели, механизмы подачи, валки прокатных станов, ленты конвейеров и др.) требуют регулирования скорости. Иногда возникает необходимость изменять и направление движения исполнительного органа (реверсировать его). Во время движения исполнительный орган преодолевает сопротивление движению, обусловливаемое силами трения

или притяжения земли, возникающими усилиями при деформации материалов.

Итак, для осуществления исполнительным органом необходимого движения при выполнении технологической операции и преодоления возникающих усилий к нему должна быть подведена определенная механическая энергия от устройства, которое в соответствии со своим назначением получило название *привода*. Таким образом, привод вырабатывает механическую энергию путем преобразования других видов энергии, в зависимости от которых различают гидравлический, пневматический, электрический и другие виды. Простейший привод – *ручной*, затем *конный* (как развитие ручного), *механический* (от ветряного двигателя, водяного колеса, турбины, паровой машины, двигателя внутреннего сгорания). В настоящее время водяные и паровые турбины широко применяются на электрических станциях (гидравлических и тепловых). Однако для привода рабочих машин основным является *электрический двигатель*, на основе которого строится *электропривод*, а на современном этапе развития техники – *автоматизированный электропривод*, потребляемый около 90 % всей вырабатываемой электрической энергии. Такое широкое применение электрической энергии и электропривода объясняется целым рядом их достоинств и преимуществ по сравнению с другими видами энергии и приводов:

- возможность передачи электроэнергии на большие расстояния с малыми потерями;
- обратимость электрических машин,
- высокий КПД;
- большой диапазон мощностей электродвигателей (от долей ватт до мегаватт) и регулирования скорости электропривода;
- жесткость механических характеристик и др.

Электропривод (ЭП) – это электромеханическая система, состоящая из электродвигателя (Д), силового преобразователя (П), передаточного механизма (ПМ) и управляющего устройства (УУ), предназначенная для привода в движение исполнительных органов рабочей машины (ИОРМ) и управления этим движением. В отдельных случаях в этой системе могут отсутствовать преобразователь и передаточное устройство. Структурная схема регулируемого электропривода представлена на рис. 1.1.

Главной частью ЭП является ЭД, служащий для преобразования электрической энергии источника питания (эл. сети) в механическую энергию вращательного или поступательного движения. Вследствие обратимости электрических машин ЭД может работать и генератором, преобразуя механическую энергию в электрическую и возвращая ее в сеть. Генераторные (тормозные) режимы используются в работе любого ЭП.

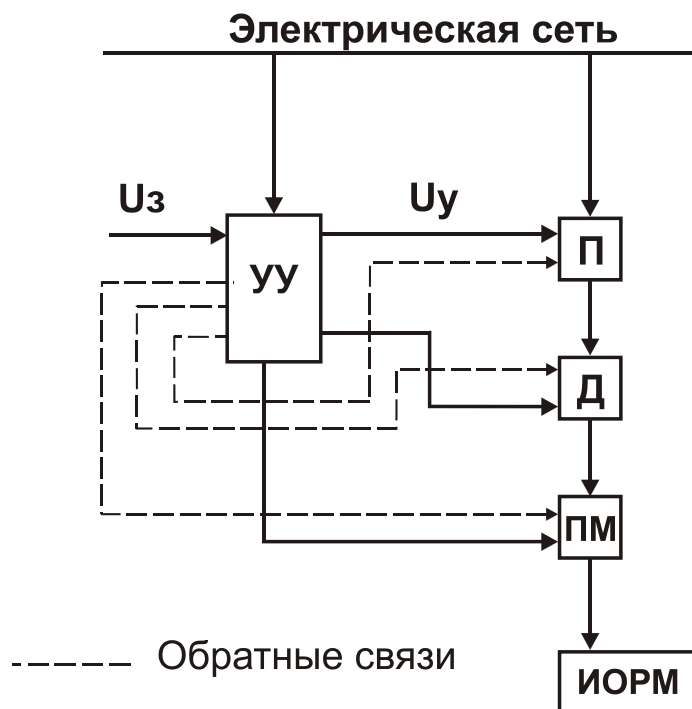


Рис.1.1. Структурная схема регулируемого электропривода

Электрическая сеть обычно имеет неизменные параметры: U_1, f_1 . Для управления количеством энергии, поступающей в ЭД, и, соответственно, параметрами механического движения (вращательный момент M и ω), между сетью и ЭД ставится *силовой преобразователь*. В качестве силового преобразователя применяется электрическая машина (электромашинный преобразователь) или полупроводниковое устройство (полупроводниковый преобразователь). В нерегулируемом ЭП преобразователь обычно отсутствует и Д непосредственно (или через пусковые устройства) подключается к электрической сети.

По технико-экономическим соображениям ЭД изготавливаются, как правило, на частоту вращения $n = 100 - 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, а для РМ обычно требуется $n = 10 - 300 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. Согласование механических параметров ЭД (ω и M) с механическими параметрами РМ осуществляется с помощью *передаточного механизма* (ПМ).

ПМ служат: зубчатые, ременные, цепные передачи, пары винт-гайка, зубчатые колесо-рейка, кривошипно-шатунные механизмы и др. При этом ПМ может изменять не только величину ω и M , но и характер движения, преобразуя вращательное движение в поступательное: передача винт-гайка, колесо-рейка. Прогрессивным направлением развития ЭП является непосредственное соединение ЭД и ИОРМ, что повышает технико-экономические показатели ЭП.

В ЭП необходимо осуществлять управление движением. В простейшем случае это пуск, торможение, реверс, а в более сложном – регулирование ω и M в соответствии с требованиями технологического процесса.

Функции управления ЭП возлагаются на УУ, которое в самых простых ЭП представляет собой ручной или дистанционный пускатель, а в самых сложных – ЭВМ.

Классификация электроприводов. В АЭП используются следующие силовые и управляющие устройства:

- электродвигатели различных видов и типов;
- механические передаточные устройства, электромагнитные муфты;
- силовые преобразователи электрической энергии;
- блоки управления: кнопки управления, командоаппараты, реле, логические элементы, регуляторы, усилители, микропроцессоры и управляющие электронные машины.

Реализация электроприводов весьма разнообразна, что находит отражение в их классификации по таким основным критериям:

1. **По характеристике движения** различают электроприводы вращательного и поступательного движения, при этом скорость ИО может быть регулируемой или нерегулируемой, а само движение - непрерывным или дискретным, однонаправленным, двунаправленным (реверсивным) или вибрационным (возвратно-поступательным).

2. **По количеству используемых электродвигателей** различают групповой, индивидуальный (одиночный) и взаимосвязанный (многодвигательный). *Групповой* ЭП характеризуется тем, что один двигатель приводит в движение несколько ИО на одной рабочей машине или по одному ИО на нескольких рабочих машинах. *Индивидуальный* ЭП обеспечивает движение одного ИО рабочей машины. *Взаимосвязанный* ЭП представляет собой два или более индивидуальных ЭП, связанных между собой электрически или механически и работающих совместно. Если движения ЭП связаны между собой механически и работают на один общий вал, то такой взаимосвязанный ЭП называют *многодвигательным*, а если движения ЭП связаны между собой электрически (электрическими цепями), то взаимосвязанный ЭП называют *электрическим валом*.

3. **По виду силового преобразователя** различают:

- с управляемым или неуправляемым выпрямителем, которые преобразуют напряжение переменного тока в напряжение постоянного (выпрямленного) тока;
- с инверторами, выполняющими обратные преобразования напряжения;
- с преобразователями частоты и напряжения переменного тока, изменяющими параметры переменного тока;
- с импульсными преобразователями напряжения постоянного тока с различными видами модуляции выходного напряжения постоянного тока.

Современные силовые преобразователи выполняются на полупроводниковых силовых элементах (транзисторах, диодах, тиристорах).

Хотя конкретная реализация ЭП может быть разнообразной, однако работа ЭП имеет некоторые общие закономерности, связанные с процессом преобразования энергии, с определением характера механического движения и с его управлением. Эти и некоторые другие вопросы теории ЭП рассматриваются в изучаемом предмете.

Краткий обзор исторического пути развития электропривода. Для получения механической энергии в XIX в. долгое время применялись паровые

машины. Котел и паровую машину устанавливали в отдельном здании на заводском дворе. Движение от паровой машины передавалось в производственное многоэтажное здание с помощью ременных или канатных передач. Внутри производственных помещений движение распределялось посредством многочисленных трансмиссий. Это был *общезаводской паровой привод*. В дальнейшем паровую машину заменил электрический двигатель.

Историю развития ЭП обычно начинают отсчитывать с 1838 года, когда русский академик Б. С. Якоби установил изобретенный им в 1834 г. первый электродвигатель (это был электродвигатель постоянного тока вращательного движения), питаемый от батареи гальванических элементов, на небольшом катере и совершил его испытательные рейсы с пассажирами по Неве. Это был первый пример реализации электрического привода и этим самым была доказана возможность практического применения электрического привода. В дальнейшем появились и другие примеры реализации электропривода: в артиллерийских установках (для их наведения на цель), в швейных машинках, для перемещения электродов дуговой сварки. Однако до конца XIX века пар и вода оставались основной силой, приводившей в движение станки и механизмы в промышленности.

В 80-х годах XIX в. было открыто явление вращающегося магнитного поля: его изобретателями считаются Галилео Феррарис – итальянский физик и электротехник, который открыл это явление в 1885 г., и Никола Тесла (серб по национальности, с 1884 г. жил в США) – электро- и радиотехник, который независимо от Г. Феррариса описал в 1888 г. явление вращающегося магнитного поля. В 1891 г. русский инженер М. О. Доливо-Добровольский, используя это явление, изобрел трехфазный асинхронный двигатель, который благодаря своей простоте и надежности до настоящего времени широко распространен на промышленных предприятиях.

В настоящее время автоматизированный электропривод является главным средством электрификации и автоматизации разнообразных технологических процессов, создания высокопроизводительных машин, механизмов и технологических комплексов.

К основным направлениям развития современных АЭП относятся:

- разработка и выпуск комплектных регулируемых электроприводов с использованием современных силовых полупроводниковых преобразователей, с использованием микропроцессорного управления;
- расширение области применения частотно-регулируемых асинхронных электроприводов (особенно с векторным управлением);
- применение ЭП с новыми типами двигателей (линейными, шаговыми, вентильными, вибрационными, повышенного быстродействия и др.);
- повышение эксплуатационной надежности, к.п.д. и других энергетических показателей электродвигателей и АЭП на их основе;
- подготовка инженерно-технических и научных кадров, способных проектировать, создавать и грамотно эксплуатировать современные АЭП.

Решение этих и ряда других связанных вопросов по электрооборудованию и электроприводам позволит достичь дальнейшего технического прогресса промышленного производства.

Изучение вопросов электрооборудования, АЭП необходимо для понимания современных средств и возможностей в области автоматизации современных горных предприятий. **Основной задачей**, стоящей перед горнодобывающей промышленностью, является обеспечение прироста добычи полезных ископаемых в основном открытым способом на основе внедрения прогрессивной технологии и горнотранспортного оборудования.

Современный карьер представляет собой предприятие с высоким уровнем механизации, где сосредоточено большое количество мощных буровых станков, выемочно-транспортирующих и других машин. А многих карьерах успешно применяется гидромеханизация, а при разработке россыпных месторождений используются драги.

Гидромеханизация – это способ механизации земляных и горных работ, при котором все или основная часть технологических процессов осуществляются под действием энергии движущегося потока воды. В гидромеханизации используется оборудование различных конструкций и назначения: гидромониторы, насосы, грунтовые насосы (землесосы) и др. **Гидромонитор** (водомет) – это устройство для создания и управления полетом мощных водяных струй, используемых для разрушения и смыва горных пород. Струя воды из гидромонитора истекает со скоростью до 80 м/с.

Для дистанционного управления гидромониторами применяются электромеханические, электрогидравлические и гидравлические схемы. Электрогидравлические схемы имеют электрическую систему управления гидравлическими механизмами и электропривод маслостанции.

Драга – плавающий горнодобычный агрегат, оснащенный землечерпальным (землесосным), обогатительным и другим оборудованием, обеспечивающим комплексную механизацию основного технологического процесса добычи, обогащения полезного ископаемого и удаления пустых пород. Драги предназначены для разработки обводненных месторождений полезных ископаемых и извлечения ценных компонентов (золота, платины, олова, алмазов и др.). По роду используемой энергии драги бывают электрические, дизель-электрические, дизельные, паровые. Рабочее оборудование драги аналогично оборудованию многочерпаковых цепных экскаваторов.

Эффективная работа сложной карьерной техники во многом зависит от уровня теоретической и практической подготовки инженерно-технического персонала предприятия. **Современный горный инженер должен глубоко знать основы механизации и автоматизации горного производства, эксплуатационные и технические характеристики горных машин и их электрооборудования. Без таких знаний нельзя ни спроектировать новый механизм, ни объяснить работу технологического оборудования с автоматизированной системой управления. Он должен также уметь осуществлять строгий контроль за соблюдением правил техники безопасности при ведении горных работ и эксплуатации применяемых оборудования и механизмов. Поэтому знание вопросов АЭП и электрооборудования горных предприятий для инженера, конструирующего или эксплуатирующего современные технологические установки и автоматические линии, является необходимым.**

Тема 2. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Виды передаточных механизмов

Электрические, механические и габаритные параметры электродвигателя взаимосвязаны. Например, номинальные мощность P_n , вращающий момент M_n , угловая скорость ротора (якоря) ω_n , диаметр D и длина L активной части якоря электрической машины связаны соотношениями

$$P_n = M_n \omega_n; \quad M_n = C_k D^2 L, \quad (2.1)$$

где C_k – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей машины.

Из этих зависимостей следует, что при заданной мощности для уменьшения габаритов электродвигателя ($D^2 L$) необходимо увеличивать его угловую скорость ω_n , особенно для маломощных двигателей (до $\omega_n = 100 \dots 600$ рад/с). А для рабочих машин по технологическим условиям требуется значительно меньшая скорость (в 10 и более раз). Поэтому для согласования механических параметров электродвигателя (скорости и момента) с механическими параметрами рабочей машины используют *передаточный механизм* (ПМ), который может изменять и характер движения, преобразуя вращательное движение в поступательное.

По конструктивному исполнению различают следующие виды ПМ (рис. 2.1, 2.2):

- 1) редукторы;
- 2) ременные (цепные) передачи;
- 3) типа барабан – трос (шкив – канат);
- 4) типа винт – гайка;
- 5) типа зубчатое колесо – рейка;
- 6) рычажные механизмы (кривошипно-шатунные и кулисные).

Дадим краткую характеристику этим ПМ.

Редукторы представляют собой зубчатые передачи, заключенные в единый корпус. По числу зубчатых пар они бывают одно-, двух-, трех-, n -ступенчатые; по виду зубьев – прямозубые, косозубые, червячные; по исполнению – цилиндрические, конические; по принципу действия – обычные и планетарные.

Редуктор характеризуется передаточным числом j :

$$j = \omega_1 / \omega_2, \quad (2.2)$$

где ω_1 – входная скорость; ω_2 – выходная скорость.

Передаточное число n -ступенчатого редуктора

$$j = j_1 \cdot j_2 \cdot \dots \cdot j_n, \quad (2.3)$$

где j_1, j_2, \dots, j_n – передаточные числа отдельных ступеней.

Редуктор характеризуется также входной мощностью (до 560 кВт) и максимальным выходным моментом (до 1200 кН·м). Входная и выходная оси редуктора могут быть расположены коаксиально, параллельно и ортогонально.

Ременные (цепные) передачи характеризуются передаточным числом

$$j = \omega_1 / \omega_2 = D_2 / D_1 = z_2 / z_1, \quad (2.4)$$

где D_1, z_1 – диаметр число зубьев входного шкива (звездочки);

D_2, z_2 – диаметр число зубьев выходного шкива (звездочки).

Передачи типа «зубчатое колесо – рейка», «барабан – трос (шкив – канат)» и «винт – гайка» преобразуют вращательное движение в поступательное и характеризуются *радиусом приведения* ρ :

$$\rho = V/\omega, \text{ м/рад.}$$

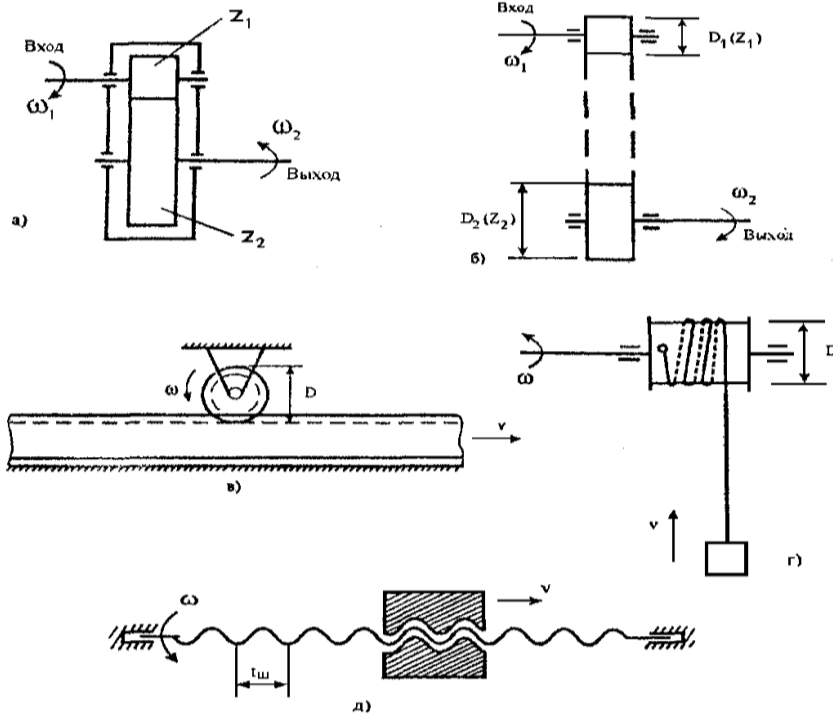


Рис. 2.1. Передаточные механизмы:

а) редуктор; б) ременная (цепная) передача; в) передача «зубчатое колесо – рейка»; г) передача «канат (трос) – барабан (шкив)»; д) передача «винт – гайка».

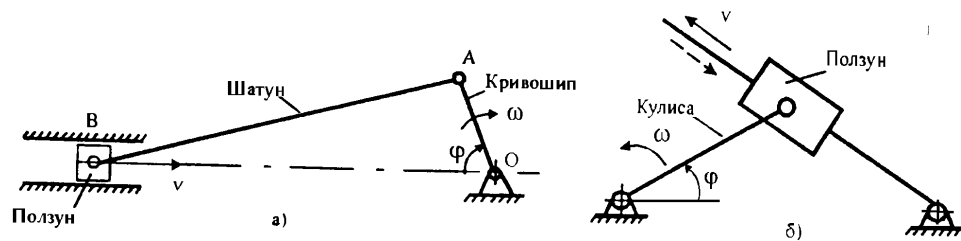


Рис. 2.2. Рычажные передаточные механизмы: а) кривошипно-шатунный механизм; б) кулисный механизм.

Кривошипно-шатунный механизм (рис. 2.2, а) служит для преобразования вращательного движения кривошипа в возвратно-поступательное движение ползуна или, наоборот, возвратно-поступательного движения ползуна во вращательное движение кривошипа.

Кулисный механизм (рис. 2.2, б) предназначен для преобразования качательного движения кулисы в поступательное движение ползуна или, наоборот, поступательного движения ползуна в качательное движение кулисы.

Рычажные механизмы характеризуются радиусом приведения ρ , являющимся функцией угла поворота φ кривошипа или кулисы.

2.2. Кинематические схемы электроприводов

Механическая часть структурной схемы ЭП включает в себя все механически связанные между собой движущиеся инерционные массы: ротор (якорь) двигателя, ПМ и рабочее оборудование технологической установки. Непосредственное представление о движущихся массах установки и механических связях между ними дает кинематическая схема ЭП. Значит, *кинематической схемой* ЭП какой-либо конкретной производственной установки называется схема механической части ЭП со всеми движущимися инерционными массами и механическими связями между ними. Кинематические схемы ЭП разнообразны. Рассмотрим два характерных их примера.

Кинематическая схема ЭП центробежного вентилятора (рис. 2.3). Ротор электродвигателя Д соединяется с рабочим колесом вентилятора с помощью соединительной муфты СМ. Все элементы кинематической схемы движутся с одной и той же угловой скоростью ω . На рабочем колесе вентилятора развивается момент сопротивления движению $M_{\text{мех}}$, зависящий от скорости $\omega_{\text{мех}}$ (рис. 2.4):

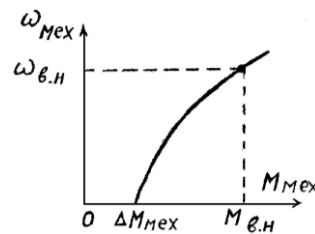
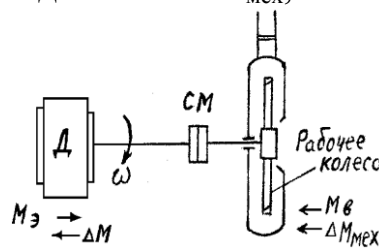


Рис. 2.3. Кинематическая схема ЭП вентилятора

Рис. 2.4. Механическая характеристика вентилятора

$$M_{\text{мех}} = \Delta M_{\text{мех}} + M_{\text{в.н.}} \left(\omega_{\text{мех}} / \omega_{\text{в.н.}} \right)^2; \quad (2.5)$$

$$\omega_{\text{в.н.}} = \omega_{\text{н.дв.}}$$

где $M_{\text{в.н.}}$, $\omega_{\text{в.н.}}$ – номинальные момент и угловая скорость вентилятора;

$\Delta M_{\text{мех}}$ – момент механических потерь на трение в подшипниках рабочего колеса вентилятора.

К ротору двигателя приложен электромагнитный момент двигателя $M_{\text{э}}$, а также момент механических потерь в двигателе ΔM , обусловленный силами трения в подшипниках, и момент сопротивления движению $M_{\text{в}}$, создаваемый вентилятором.

Номинальная угловая скорость двигателя $\omega_{\text{н.дв}}$ совпадает с номинальной скоростью вентилятора. Этим определяется простота кинематической схемы ЭП.

В других случаях $\omega_{\text{в.н.}} \neq \omega_{\text{н.дв}}$ и в кинематическую схему вводят различные передачи: зубчатые, цепные, фрикционные, клиноременные и др. (см. рис. 2.1). Если требуется механическое регулирование скорости, вводят передачи с переменным передаточным числом i (коробки передач, фрикционные вариаторы).

Кинематическая схема электропривода шпинделя токарного станка (рис. 2.5). В этой схеме движение от электродвигателя Д к шпинделю Ш с заготовкой обрабатываемой детали З передается через клиноременную передачу КРП и коробку передач КП. Передаточное число i может изменяться ступенчато за счет введения в зацепление шестерен с различным числом зубьев. В результате взаи-

модействия вращающейся детали с неподвижным резцом возникает усилие резания F_z и момент резания

$$M_{\text{мех}} = M_z = F_z R_3, \quad (2.6)$$

где R_3 – радиус заготовки обрабатываемой детали.

В процессе обработки детали усилие и момент резания остаются постоянными и не зависят от угловой скорости ω_3 (рис. 2.6). Полезный момент нагрузки механизма $M_{\text{мех}}$ при постоянном усилии резания F_z пропорционален радиусу обрабатываемой детали R_3 .

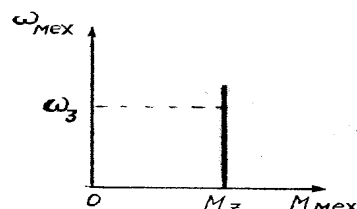
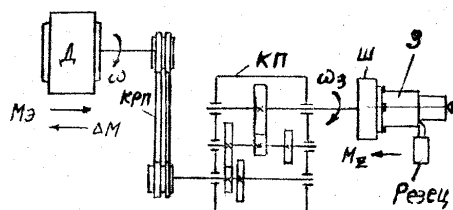


Рис. 2.5. Кинематическая схема ЭП шпинделя токарного станка

Рис. 2.6. Механическая характеристика

Кроме полезного момента нагрузки $M_{\text{мех}} = M_z$ а также приложенного к ротору двигателя электромагнитного момента M и момента потерь в двигателе ΔM во всех элементах рассматриваемой кинематической цепи действуют силы трения: в подшипниках, в зубчатых зацеплениях, в трущихся поверхностях клиноременной передачи.

2.3. Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей

При выборе электродвигателя к производственному механизму приходится уточнять, насколько механические свойства электродвигателя соответствуют механической характеристике рабочей машины и характеру ее работы, так как соответствие механических характеристик электродвигателя конкретному производственному механизму позволяет обеспечить наиболее высокую его производительность и экономичную работу.

Механическая (или *статическая*) **характеристика производственного механизма** представляет собой зависимость между его статическим моментом сопротивления и скоростью, т.е.

$$\omega = f(M_c) \quad \text{или} \quad M_c = f(\omega).$$

Производственные механизмы обладают различными механическими характеристиками. Существует следующая эмпирическая обобщенная формула для механических характеристик производственных механизмов:

$$M_c = M_0 + (M_{c,n} - M_0)(\omega / \omega_n)^x, \quad (2.7)$$

где M_c – момент сопротивления механизма при угловой скорости ω ;

M_0 – момент сопротивления трения в движущихся частях механизма;

$M_{c,n}$, ω_n – номинальные момент сопротивления и скорость;

x – показатель степени, характеризующий изменение момента M_c при изменении угловой скорости ω .

Различают четыре основных вида (класса, категории) механических характеристик и соответственно производственных механизмов (рис. 2.7):

1) $x = 0$, $M_c = \text{const}$ (момент сопротивления не зависит от скорости). Такой механической характеристикой обладают механизмы, совершающие работу подъема, формоизменения материала или преодолевающие трение (подъемные механизмы, механизмы передвижения и др.). Мощность таких механизмов возрастает линейно со скоростью;

2) $x = 1$, $M_c = c\omega$ (момент сопротивления линейно зависит от угловой скорости). Такую характеристику может иметь, например, привод генератора постоянного тока, работающего на постоянное сопротивление. Здесь мощность пропорциональна квадрату скорости;

3) $x = 2$, $M_c = c\omega^2$. Такой механической характеристикой обладают механизмы, работа которых сводится к преодолению сопротивления воздуха или жидкости (вентиляторы, центробежные насосы, центрифуги, судовые винты и др.). Момент сопротивления у таких механизмов часто называют *вентиляторным*, а механизмы – механизмами с *вентиляторным моментом*. Мощность таких механизмов примерно пропорциональна кубу скорости;

4) $x = 3$, $M_c = c/\omega$. Такой механической характеристикой обладают моталки в металлургической промышленности, электронакат в бумажной промышленности, некоторые металлорежущие станки. Мощность на валу у таких машин приблизительно постоянна.

Механические характеристики электродвигателей представляют собой зависимость угловой скорости ω от развиваемого им момента на валу, т.е. $\omega = f(M)$.

Различают естественные и искусственные механические характеристики электродвигателя. *Естественная* механическая характеристика соответствует работе электродвигателя с номинальными параметрами при нормальной схеме включения. *Искусственная* механическая характеристика соответствует работе электродвигателя с параметрами, отличающимися от номинальных, например, при введении сопротивления, изменении питающего напряжения, частоты и др.

Для оценки изменения скорости при изменении момента на валу служит так называемая *жесткость характеристики*, которая равна отношению приращения момента ΔM к соответствующему приращению скорости $\Delta\omega$ (рис. 2.8):

$$\beta = (M_2 - M_1) / (\omega_2 - \omega_1) = \Delta M / \Delta\omega.$$

Линейные механические характеристики имеют постоянную жесткость, а криволинейные – в каждой точке свою, равную первой производной от момента по скорости, т.е.

$$\beta = dM / d\omega. \quad (2.8)$$

Естественные механические характеристики электродвигателей по степени жесткости разделяются на следующие группы (рис. 2.9):

1) *абсолютно жесткая характеристика* (линия 1), при которой скорость электродвигателя при изменении нагрузки не изменяется ($\beta = \infty$). К этой группе относятся синхронные двигатели;

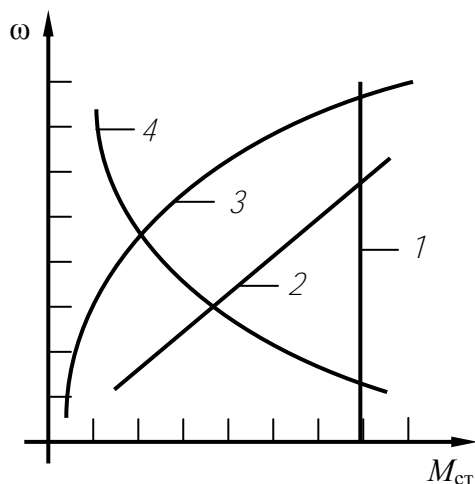


Рис. 2.7. Механические характеристики производственных механизмов

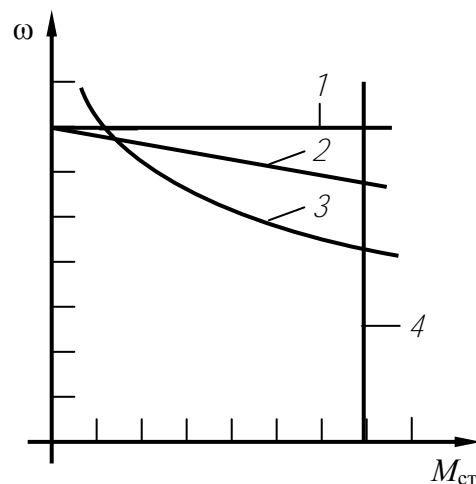


Рис. 2.9. Механические характеристики электродвигателей

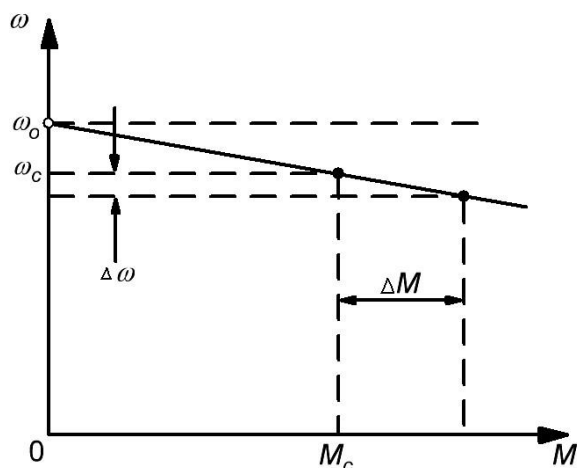


Рис. 2.8. К пояснению жесткости механической характеристики электродвигателя

2) *жесткая характеристика* (линия 2), при которой скорость электродвигателя с возрастанием момента нагрузки уменьшается на небольшую величину ($\beta = 40 \dots 10$). К этой группе относятся асинхронные электродвигатели (работающие при скольжениях меньших критического) и двигатели постоянного тока с параллельным (и независимым) возбуждением;

3) *мягкая механическая характеристика* (линия 3), при которой скорость электродвигателя резко уменьшается с увеличением момента нагрузки ($\beta < 10$). Такой характеристикой обладает двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением.

При совместной работе электродвигателя с производственным механизмом в установившемся режиме вращающий момент двигателя уравнивается статическим моментом сопротивления механизма, при этом электродвигатель работает с определенной скоростью. При изменении момента сопротивления на валу электродвигателя равновесие моментов нарушается, возникает переходный процесс, в результате которого электропривод переходит в новое установившееся состояние

(при устойчивой работе), но с другими значениями момента и скорости электродвигателя. Для устойчивой работы электропривода в пределах определенных скоростей и моментов сопротивления производственного механизма требуется, чтобы электродвигатель обладал соответствующей механической характеристикой. А это достигается выбором электродвигателя определенного типа и изменением электрических параметров его цепей.

Механические характеристики двигателей и механизмов играют исключительно важную роль в теории и практике ЭП, так как позволяют решать следующие задачи:

- найти точку установившегося режима, т.е. определить $\omega_{уст}$ и $M_{уст}$;
- определить, будет ли устойчиво движение в установившемся режиме;
- определить энергетические режимы работы двигателя и механизма, т.е. направление потоков энергии в установившемся режиме;
- сформулировать принципы регулирования скорости и момента ЭП и дать количественную оценку различным способам регулирования;
- определить поведение ЭП в переходных режимах.

Рассмотрим первые две из указанных задач.

Пусть механическая характеристика двигателя и механизма имеют вид (рис.2.10).

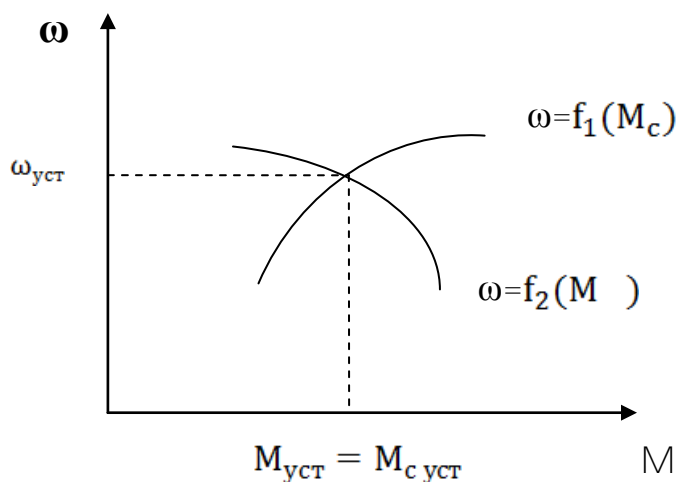


Рис. 2.10. К нахождению точки установившегося режима и определению устойчивости движения ЭП

Уравнение движения для установившегося режима выражает равенство M_d и M_c .

$$M_d = M_c. \quad (2.9)$$

Движение привода в установившемся режиме может быть *устойчивым* или *неустойчивым*. Если движение устойчиво, то при случайно возникшем отклонении ω от $\omega_{уст}$ привод возвратится в точку установившегося режима.

С точки зрения устойчивости привод в какой-то мере подобен пирамиде (рис.2.11).

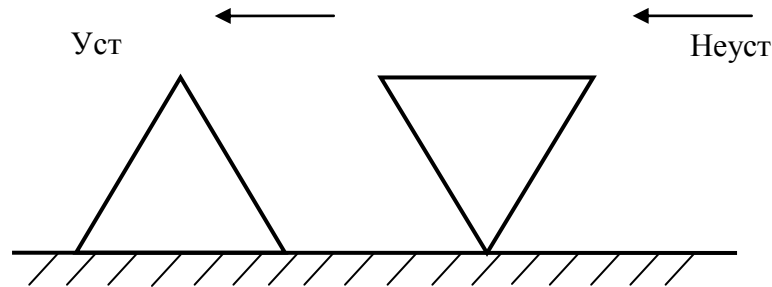


Рис. 2.11. К определению устойчивости движения ЭП

Рассмотрим вопрос об устойчивости движения привода с характеристиками (рис.2.12):

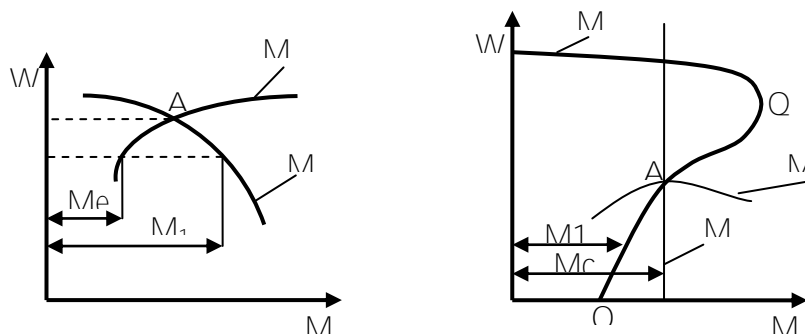


Рис. 2.12. Определение устойчивости движения ЭП

Пусть по какой-то причине $\omega_1 < \omega_{уст}$. Тогда $M_1 > M_{c1}$ и возникает “+” $M_{дин} = M_1 - M_{c1} > 0$, которому соответствует положительное ускорение, т.е. система возвращается в точку установившегося режима – движение устойчиво.

Для решения вопроса об устойчивости необходимо одновременно рассмотреть механические характеристики двигателя и механизма на примере АД. Участок а-б называют *неустойчивым*.

Если механическая характеристика механизма вертикальна (M_c') – движение в точке А *неустойчиво*. Если механическая характеристика M_c'' – то движение в точке А – *устойчиво*.

Условие устойчивости движения: движение устойчиво, если в точке установившегося режима выполняется условие $\beta < \beta_c$.

2.4. Расчетные схемы механической части электропривода

Механическая часть ЭП может представлять сложную кинематическую схему с большим числом движущихся элементов, при этом одни элементы совершают вращательное движение, другие – поступательное (например, в подъемниках, кранах, строгальных станках и др.). Каждый элемент обладает определенной *упругостью* (т.е. под нагрузкой может деформироваться), а в соединительных элементах могут быть воздушные зазоры. Значит, механическая схема ЭП является *многомассовой*, с упругими связями и зазорами, расчет динамики которой составляет определенные трудности (нужно использовать программы расчетов на ЭВМ).

В инженерных расчетах, не требующих большой точности, в системах с незначительными упругостями элементов и небольшими зазорами (т.е. с большой жесткостью) принимают **допущение**, что механические связи элементов являются абсолютно жесткими. При таком допущении движение одного элемента дает полную информацию о движении и других элементов.

Обычно в качестве такого первоначального элемента принимают вал двигателя. Тогда расчетная схема многомассовой механической части ЭП (рис. 2.10, а, 2.11, а) сводится к одному обобщенному жесткому механическому звену (рис. 2.10, б, 2.11, б), имеющему эквивалентную массу с моментом инерции J , угловую скорость вращения ω , угол поворота φ , и на которое звено действуют электромагнитный момент двигателя M и суммарный приведенный к валу двигателя статический момент сопротивления M_c (включающий все механические потери в системе, в том числе и в двигателе).

Приведение моментов сопротивления и сил, моментов инерции и масс к валу электродвигателя. Сначала примем допущение, что передаточный механизм ПМ (рис. 2.13, а) идеальный, т.е. не имеет потерь энергии, не обладает массой и осуществляет только количественное преобразование механической энергии от двигателя к производственному механизму. Учет потерь в ПМ рассмотрим несколько позже.

Приведение статических моментов сопротивления к валу осуществляется из условия равенства передаваемой мощности на любом валу (см. рис. 2.13, а):

$$M_c \omega = M_M \omega_M.$$

Из этого равенства находим выражение для определения приведенного статического момента M_c :

$$M_c = M_M (\omega_M / \omega) = M_M / (\omega / \omega_M) = M_M / j, \quad (2.10)$$

где $j = \omega / \omega_M$ – передаточное число ПМ.

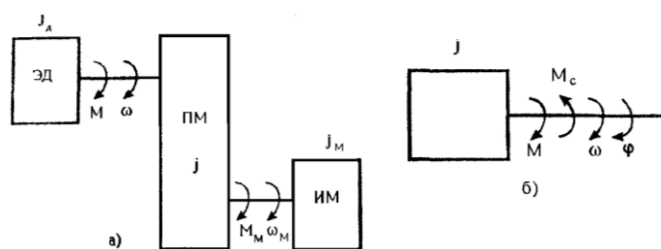


Рис. 2.13. Приведение многомассовой системы к одномассовой при вращательном движении механизма

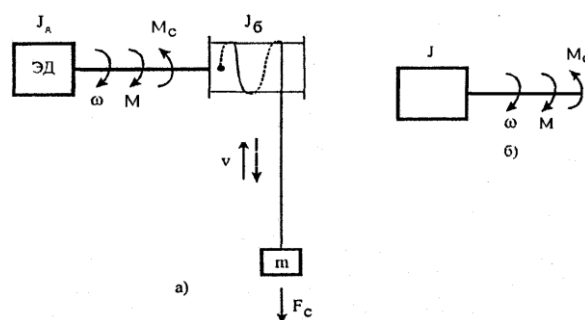


Рис. 2.14. Приведение многомассовой системы к одномассовой при поступательном движении механизма

Следовательно, статический момент на валу электродвигателя при отсутствии потерь в ПМ равен моменту сопротивления M_M на валу исполнительного механизма ИМ, деленному на передаточное число i ПМ. В этом и заключается приведение момента сопротивления ИМ к валу электродвигателя.

При поступательном движении ИМ (см. рис. 2.14, а) и допущении об идеальности передачи из условия равенства передаваемой мощности от электродвигателя ЭД к поднимаемому грузу имеем равенство

$$M_c \omega = F_c V,$$

где M_c – эквивалентный статический момент на валу ЭД одномассовой системы (см. рис. 3.2, б);

F_c – сила сопротивления в установившемся режиме;

V – линейная скорость подъема груза.

Тогда из этого равенства получаем

$$M_c = F_c V / \omega = F_c \rho, \quad (2.11)$$

где ρ – радиус приведения поступательного движения к вращательному.

Значит, приведенный к валу электродвигателя статический момент от силы сопротивления для поступательного движения при идеальной передаче равен силе сопротивления F_c , умноженной на радиус приведения ρ .

Теперь рассмотрим приведение моментов инерции и масс к валу электродвигателя для *линейных* ПМ ($j = \text{const}$, $\rho = \text{const}$).

Мерой инерции для поступательно движущихся тел является масса m (кг), а для вращающихся тел – момент инерции J (кг·м²). Динамическая сила для поступательно движущихся тел связана с линейным ускорением a (м/с²) вторым законом Ньютона $F_{\text{дин}} = m \cdot a$. Для вращающихся тел этот закон выражается в виде

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \varepsilon, \quad (2.12)$$

где J – момент инерции вращающегося тела, кг·м²;

$\varepsilon = d\omega/dt$ – угловое ускорение (замедление), рад/с²;

ω – угловая скорость, рад/с;

t – время, с.

Для решения задач динамики электропривода необходимо знать моменты инерции вращающихся и движущихся поступательно тел. Моменты инерции роторов электрических машин приводятся в справочной литературе, а моменты инерции различных рабочих машин, механизмов, редукторов, муфт и т.д. определяются расчетным или экспериментальным путем.

Приведение моментов инерции ИМ к валу ЭД осуществляется из условия, что величина суммарного запаса кинетической энергии системы, приведенной к валу ЭД, остается неизменной (см. рис. 2.13):

$$J \omega^2 / 2 = J_d \omega^2 / 2 + J_M \omega_M^2 / 2.$$

Из этого равенства находим, что суммарный момент инерции приведенной системы

$$J = J_d + J_M (\omega_M / \omega)^2 = J_d + J_M / j^2 = J_d + J_M', \quad (2.13)$$

где J_M' – приведенный к валу ЭД момент инерции ИМ.

Значит, приведенный к валу ЭД момент инерции ИМ при идеальном ПМ равен моменту инерции ИМ, деленному на передаточное число ПМ в квадрате:

$$J_M' = J_M / j^2. \quad (2.14)$$

Для поступательного движения ИМ (см. рис. 2.14) приведение поступательно движущихся масс к вращательному движению вала ЭД осуществляется на основании равенства кинетических энергий приведенной и исходной (не приведенной) систем:

$$J \omega^2 / 2 = (J_d + J_6) \omega^2 / 2 + m V^2 / 2,$$

из которого получаем, что

$$J = J_d + J_6 + m (V/\omega)^2 = J_d + J_6 + m \rho^2 = J_d + J_6 + J_M', \quad (2.15)$$

где

$$J_M' = m \rho^2,$$

J_M' – приведенный к валу ЭД момент инерции поступательно движущейся массы m .

Следовательно, приведенный к валу ЭД момент инерции поступательно движущейся массы m равен произведению этой массы на радиус приведения ρ в квадрате.

Учет потерь в передачах. Потери энергии (мощности) в ПМ учитывают двумя способами: 1) приближенным (с помощью КПД) и 2) уточненным (путем вычисления всех составляющих потерь). Рассмотрим *первый способ*.

Механическая часть ЭП (рис. 2.15) включает ротор ЭД, вращающийся с угловой скоростью ω и приложенным моментом M , передаточный механизм ПМ с КПД $\eta_{п}$ и передаточным числом j и исполнительный механизм ИМ, вращающийся со скоростью ω_M и приложенным моментом сопротивления M_M . При направлении энергии от ЭД к ИМ имеем двигательный режим работы ЭП, а при обратном потоке энергии – тормозной. В установившемся режиме работы ЭП, который мы и будем рассматривать для учета потерь в ПМ, движущий момент M на валу ЭД равен приведенному к валу статическому моменту M_c , который учитывает момент сопротивления M_M ИМ и момент потерь в ПМ, т.е. $M = M_c$. Для наглядности обозначим M_c в двигательном режиме ЭП через $M_{c\uparrow}$, а в тормозном – через $M_{c\downarrow}$. Тогда, исходя из закона сохранения энергии, можно записать равенства:

$$\omega M_{c\uparrow} \eta_{п} = M_M \omega_M \quad \text{для двигательного режима,}$$

$$M_M \omega_M \eta_{п} = M_{c\downarrow} \omega \quad \text{для тормозного режима,}$$

из которых следует, что

$$M_{c\uparrow} = (M_M \omega_M) / (\omega \eta_{п}) = M_M / (j \eta_{п}) = M_M' / \eta_{п}, \quad (2.16)$$

$$M_{c\downarrow} = M_M \omega_M \eta_{п} / \omega = M_M \eta_{п} / j = M_M' \eta_{п}, \quad (2.17)$$

где M_M' – момент ИМ, приведенный к валу ЭД без учета потерь в ПМ.

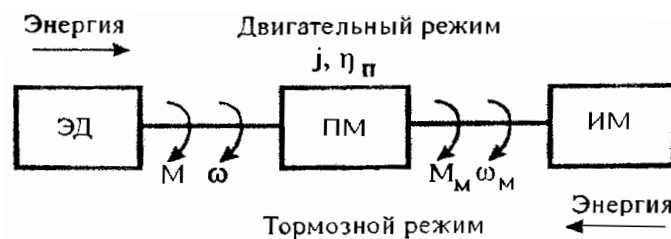


Рис. 2.15. Механическая часть электропривода

Следовательно, для учета потерь в ПМ при приведении статических моментов и сил сопротивления ИМ в формулах (2.10) и (2.11) необходимо в двигательном режиме работы ЭП учесть КПД $\eta_{п}$ в знаменателе, а в тормозном режиме – в числителе, т.е.

$$M_{c\uparrow} = M_M / (j \eta_{п}) = F_c \rho / \eta_{п}, \quad (2.18)$$

$$M_{с\downarrow} = M_M \eta_{п} / j = F_c \rho \eta_{п}. \quad (2.19)$$

Но КПД $\eta_{п}$ не является постоянной величиной, он зависит от коэффициента загрузки K_3 и номинального КПД $\eta_{п\text{ ном}}$ [1]:

$$\eta_{п} = [1 / \eta_{п\text{ ном}} + \alpha (1 / K_3 - 1)] - 1, \quad (2.20)$$

где α – коэффициент постоянных потерь, который для некоторых передач приводится в справочниках.

Учитывая, что для многих передач $\eta_{п\text{ ном}} \approx 0,8 \dots 0,9$, в расчетах можно ориентировочно принять $\alpha = 0,07 \dots 0,1$ и по приведенной формуле рассчитывать КПД передачи при частичной загрузке ЭП.

2.5. Уравнение вращательного движения электропривода

В работе электропривода различают два основных режима: установившийся и переходный. В *установившемся режиме* электропривод работает с постоянной скоростью. Нарушение постоянства скорости (при регулировании хода технологического процесса, изменении параметров питающего напряжения и др.) вызывает *переходный режим*, в течение которого система «электродвигатель – рабочая машина» переходит в новое установившееся состояние.

Изучением поведения электропривода в переходных режимах занимается *динамика электропривода*, используя уравнение движения электропривода. Рассмотрим данное уравнение. При работе электропривода под нагрузкой с постоянной скоростью вращения вращающий момент электродвигателя M уравнивается статическим моментом сопротивления M_c , приложенным к валу электродвигателя со стороны рабочей машины, т.е.

$$M = M_c. \quad (2.21)$$

Такой режим работы электропривода называется *установившимся*. При нарушении равенства (4.1) возникает динамический момент $M_{\text{дин}}$, характеризующий переходный режим. При этом уравнение равновесия моментов имеет вид

$$M = M_c + M_{\text{дин}}, \quad (2.22)$$

где M – вращающий момент электродвигателя, Н·м;

M_c – статический момент сопротивления, приведенный к валу электродвигателя, Н·м;

$M_{\text{дин}}$ – динамический момент, приведенный к валу электродвигателя, Н·м.

Рассмотрим подробнее отдельные составляющие уравнения (4.2). *Вращающий (или электромагнитный) момент* электродвигателя M создается в результате взаимодействия магнитного потока с током, протекающим по ротору или якорю электродвигателя. *Момент на валу* электродвигателя M_v отличается от электромагнитного момента M на величину момента потерь холостого хода M_0 , определяемого трением в подшипниках, щеток о коллектор или кольца, вентиляторными потерями и потерями в стали. Момент на валу электродвигателя зависит от режима работы электропривода. В двигательном режиме момент M_0 уменьшает момент на валу, а в тормозном режиме увеличивает его. Поэтому

$$M_v = M \pm M_0. \quad (2.23)$$

Величина M_0 составляет несколько процентов от номинального момента M_n на валу электродвигателя.

Вращающий момент электродвигателя считается *положительным*, если он направлен в сторону движения рабочей машины, и *отрицательным* – если против движения (режим торможения).

Момент статического сопротивления M_c состоит из момента полезной работы (например, подъем груза) и момента трения $M_{тр}$, который учитывается коэффициентом полезного действия механизма.

Моменты, соответствующие полезной работе, бывают двух видов: реактивные и активные.

Реактивные моменты – это моменты, которые во всех случаях являются тормозящими, противодействующими движению. К ним относятся моменты резания, кручения, давления, сжатия неупругих тел и моменты трения. Реактивные моменты меняют свой знак при изменении направления вращения привода.

Активные (или потенциальные) моменты – это моменты от веса, сжатия, растяжения и скручивания упругих тел. В отличие от реактивных активные моменты сохраняют направление своего действия при изменении направления вращения привода. Они могут быть направлены как по направлению движения, так и против него. Активные моменты, препятствующие движению, принимаются со знаком «минус», а способствующие движению – со знаком «плюс».

Динамический момент определяется угловым ускорением (замедлением) и моментом инерции системы электропривода:

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt},$$

где J – момент инерции всех движущихся частей, кг·м²;

$d\omega/dt$ – угловое ускорение (замедление), рад/с²;

ω – угловая скорость, рад/с;

t – время, с.

При постоянном моменте инерции уравнение движения электропривода

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.24)$$

или
$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.25)$$

Знак перед $M_{дин}$, следовательно, и перед $d\omega/dt$ зависит от соотношения величин и знаков M и M_c . При $M > M_c$ привод ускоряется, $d\omega/dt > 0$, $M_{дин}$ – положительная величина. При $M < M_c$ привод замедляется, $d\omega/dt < 0$, $M_{дин}$ – отрицательная величина. Когда $M = M_c$, ускорение или замедление отсутствует, т.е. $d\omega/dt = 0$, $M_{дин} = 0$, привод работает в установившемся режиме с постоянной скоростью ω .

В общем виде уравнение движения электропривода (2.24) с учетом режимов работы электродвигателя и знаков моментов можно записать

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.26)$$

Время разгона и торможения электропривода. Время переходного режима для некоторых производственных механизмов в значительной степени определяет их производительность, влияет на выбор электродвигателя и т.д.

Для определения времени переходного процесса необходимо решить уравнение движения электропривода относительно времени:

откуда
$$\begin{aligned} dt &= J d\omega / (M - M_c), \\ t &= \int J d\omega / (M - M_c). \end{aligned} \quad (2.27)$$

Для решения данного уравнения необходимо знать зависимости момента двигателя M и момента сопротивления M_c от угловой скорости ω . Частные случаи этой задачи должны учитывать знаки моментов и пределы интегрирования.

При *разгоне электродвигателя* с помощью пускового реостата можно принять момент электродвигателя постоянным и равным:

$$M = \alpha M_H = \text{const},$$

где αM_H – средний момент при пуске;

α – коэффициент, учитывающий кратность среднего пускового момента по отношению к номинальному моменту электродвигателя M_H .

Для случая пуска электродвигателя из неподвижного состояния с $M_c = \text{const}$ и $J = \text{const}$ время разгона

$$t_p = J \int_0^{\omega_c} d\omega / (\alpha M_H - M_c) = J \omega_c / (\alpha M_H - M_c). \quad (2.28)$$

При электрическом *торможении электропривода* уравнение движения будет иметь вид

$$-M - M_c = J (d\omega/dt).$$

Из этого уравнения следует, что время торможения электропривода

$$t_T = - \int_{\omega_c}^0 J d\omega / (M + M_c).$$

Принимая по-прежнему $M = \alpha M_H = \text{const}$, $M_c = \text{const}$, $J = \text{const}$, время торможения от скорости ω_c до 0 будет

$$t_T = J \int_0^{\omega_c} d\omega / (\alpha M_H + M_c) = J \omega_c / (\alpha M_H + M_c). \quad (2.29)$$

Анализ полученных выражений для t_p и t_T показывает, что одним из существенных факторов, определяющих длительность переходного процесса, является момент инерции электропривода. Поэтому в электроприводах с частыми пусками и торможениями применяют специальные электродвигатели с уменьшенным диаметром при соответствующем удлинении ротора (крановые электродвигатели). В электроприводах большой мощности вместо одного двигателя устанавливают два – каждый половинной мощности, что позволяет сократить время переходного режима в два раза.

Выбор оптимального передаточного числа редуктора. При проектировании и модернизации электропривода приходится решать задачу по выбору оптимального (наивыгоднейшего) передаточного числа редуктора $i_{\text{опт}}$. Практически это сводится к определению номинальной скорости вращения электродвигателя. Если электродвигатели одинаковой мощности, но с большей номинальной скоростью имеют меньшие габариты, массу и стоимость, то целесообразно использовать более быстроходные электродвигатели. Однако при этом оказывается, что редуктор должен иметь большее передаточное число (это повышает его стоимость). Для электроприводов с редкими пусками выбор $i_{\text{опт}}$ (или номинальной скорости вращения электродвигателя) производится из условия *наименьшей общей стоимости электродвигателя и редуктора*.

Для электроприводов с частыми пусками наиболее существенным критерием является сокращение общего времени переходного процесса $t_p + t_T$ до минимума. Рассмотрим определение $i_{\text{опт}}$, исходя из минимума времени переходного процесса

$t_{п.п.}$. Представим время переходного процесса, используя выражения (2.28) и (2.29), в таком виде:

$$t_{п.п.} = t_p + t_T = (J_d \delta + J_M / j^2) \omega_c / (\alpha M_H - M_C) + (J_d \delta + J_M / j^2) \omega_c / (\alpha M_H + M_C). \quad (2.30)$$

Здесь суммарный момент инерции системы электропривода J , приведенный к валу электродвигателя, представлен в виде

$$J = J_d \delta + J_M / j^2, \quad (2.31)$$

где $\delta = 1, 1.1 \dots 1.3$ – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора (так как момент инерции редуктора в большинстве своем неизвестен, то его в расчетах принимают равным 10...30 % от момента инерции ротора электродвигателя J_d), т.е. составляющая $J_d \delta$ – это суммарный момент инерции ротора электродвигателя и редуктора.

Принимая $\omega_c = \omega_H$, умножим и разделим оба слагаемых выражения (2.30) на ω_H и учтем, что

$$M_H \omega_H = P_H; \quad M_C \omega_H = P_C; \quad J_d \delta \omega_H^2 = 2 W_{к.д.}; \\ J_M (\omega_H / j)^2 = J_M \omega_M^2 = 2 W_{к.м.}$$

Здесь ω_H – номинальная угловая скорость вращения.

Тогда

$$t_{п.п.} = 2 (W_{к.д.} + W_{к.м.}) / (\alpha P_H - P_C) + 2 (W_{к.д.} + W_{к.м.}) / (\alpha P_H + P_C), \quad (2.32)$$

где $W_{к.д.}$ – кинетическая энергия ротора электродвигателя с редуктором;

$W_{к.м.}$ – кинетическая энергия движущихся частей механизма;

P_H – номинальная мощность электродвигателя;

P_C – статическая мощность нагрузки на валу электродвигателя.

Номинальная мощность электродвигателя определяется его нагревом при данной нагрузке и является неизменной величиной. Статическая мощность нагрузки определяется работой, которую должен совершить исполнительный механизм. Кинетическая энергия механизма определяется его конструкцией. Следовательно, единственной величиной, которую можно изменять в (2.8), является кинетическая энергия $W_{к.д.}$. При минимуме $W_{к.д.}$ будем иметь минимум времени переходного процесса $t_{п.п.}$. Отсюда следует простое правило определения оптимального передаточного числа редуктора: для заданной номинальной мощности P_H из каталога выбирают несколько электродвигателей на разные номинальные скорости и вычисляют произведение $J_{д_i} \omega_{H_i}^2$ (или $J_{д_i} j_i^2$, так как $j_i = \omega_{H_i} / \omega_M = \text{const}$), из которых выбирают наименьшее.

Тогда

$$j_{\text{опт}} = \omega_{H \text{ опт}} / \omega_M. \quad (2.33)$$

Тема 3. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для обеспечения требуемых режимов работы машин, производственных механизмов и самого электропривода (ЭП) некоторые переменные, которые характеризуют их работу, должны регулироваться. Такими переменными, часто называемыми в ЭП координатами, являются скорость, ускорение, положение ИО или любого другого механического элемента привода, токи в электрических цепях двигателей, моменты на их валу и др.

Типичным примером необходимости регулирования координат может служить ЭП пассажирского лифта. При пуске и остановке кабины лифта для обеспечения комфортности пассажиров ускорение и замедление ее движения ограничиваются. Перед остановкой скорость кабины должна снижаться, т. е. регулироваться, а кабина с заданной точностью должна останавливаться на требуемом этаже. Такое управление движением кабины лифта обеспечивается за счет регулирования соответствующих координат (переменных) ЭП лифта.

Отметим, что процесс регулирования координат движения всегда связан с получением искусственных (регулируемых) характеристик двигателя, что достигается целенаправленным воздействием на двигатель. Рассмотрим подробнее регулирование основных координат ЭП.

3.1. Регулирование скорости. Показатели качества регулирования скорости электродвигателей

Регулирование скорости движения исполнительных органов требуется во многих рабочих машинах и механизмах - прокатных станах, подъемно-транспортных механизмах, горнодобывающих и бумагоделательных машинах, металлообрабатывающих станках и др. С помощью ЭП обеспечиваются регулирование и стабилизация скорости движения их ИО, а также изменение скорости ИО в соответствии с произвольно изменяющимся задающим сигналом (слежение) или по заранее заданной программе (программное движение). Рассмотрим, каким образом с помощью ЭП можно обеспечивать регулирование скорости ИО рабочих машин.

Как следует из общей схемы ЭП, скорости двигателя и ИО при его вращательном или поступательном движении связаны между собой соотношениями

$$\omega_{ИО} = \omega / j \quad \text{или} \quad v_{ИО} = \omega r. \quad (3.1)$$

Анализ выражения (3.1) показывает, что регулировать скорость движения ИО можно воздействием или на механическую передачу, или на двигатель, или на то и другое одновременно.

В первом случае воздействие заключается в изменении передаточного числа j или радиуса приведения r механической передачи при постоянной скорости двигателя, поэтому этот способ регулирования получил название *механического*. Для его реализации используются коробки передач (при ступенчатом регулировании), вариаторы и электромагнитные муфты (для плавного регулирования). Механический способ применяется ограниченно из-за сложности автоматизации таких технологических процессов, малого набора регулируемых механических передач указанного типа и их невысоких надежности и экономичности.

Способ регулирования скорости ИО, получивший название *электрического*, предусматривает воздействие на двигатель при неизменных параметрах механической передачи. Этот способ нашел широкое применение в современных ЭП вследствие его больших регулировочных возможностей, простоты, удобства использования в общей схеме автоматизации технологических процессов и экономичности.

Комбинированный способ регулирования скорости ИО применяется ограниченно в основном в ЭП металлообрабатывающих станков.

Итак, управление движением исполнительных органов современных рабочих машин и механизмов в большинстве случаев достигается за счет целенаправленного воздействия на электродвигатель с помощью его системы управления с целью получения соответствующих искусственных характеристик.

К основным показателям, характеризующим электродвигатель, относятся его регулировочные свойства. Регулирование скорости имеет первостепенное значение для большинства простых механизмов, так как при этом обеспечиваются их наилучшие технико-экономические показатели.

При сравнении и оценке регулировочных свойств ЭД необходимо учитывать следующие *показатели регулирования*:

1. **Направление регулирования** — возможность получения характеристик выше или ниже основной. Различают *однозонное регулирование вниз от основной скорости, однозонное вверх от основной, и двухзонное регулирование скорости*.

2. **Диапазон регулирования** — отношение максимальной скорости к минимальной при заданном (номинальном) моменте нагрузки.

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$$

3. **Плавность регулирования** — характеризуется отношением соседних скоростей при заданном моменте нагрузки. Чем меньше это отношение, тем выше плавность. Плавность регулирования повышается с увеличением числа ступеней пуска (торможения) реостата.

4. **Стабильность скорости** на искусственных характеристиках при изменении M_c . Этот показатель тесно связан с жесткостью искусственных характеристик. Чем больше жесткость характеристики, тем меньше сказывается влияние колебаний M_c на скорость электродвигателя, тем устойчивее работа электропривода.

5. **Мощность и момент электродвигателя** при регулировании, т.е. регулирование скорости с $M = \text{const}$ и регулирование скорости с $P = \text{const}$.

Электрический двигатель рассчитывается и проектируется таким образом, чтобы, работая на естественной характеристике с номинальными скоростью, током, моментом и мощностью, он не нагревался выше определенной температуры, на которую рассчитана его изоляция. В этом случае срок его службы является нормативным и составляет обычно 15... 20 лет. Поскольку потери энергии при нагреве двигателя пропорциональны квадрату тока, нормативный нагрев будет иметь место при протекании номинального тока в нем. Отметим при этом, что нагрев определяется также и условиями охлаждения (вентиляции) двигателя.

При регулировании скорости двигатель работает уже на искусственных

характеристиках, т. е. при отличных от паспортных условиях. Поэтому для сохранения его нормативного нагрева и тем самым расчетного срока службы нагрузка двигателя (при расчетных условиях его охлаждения) может быть только такой, при которой в нем протекает ток не выше номинального. Именно такая нагрузка и называется допустимой.

Все способы регулирования скорости делятся по этому признаку на две группы, для одной из которых характерна допустимая нагрузка, равная номинальному моменту, а для другой - равная номинальной мощности двигателя. При правильном выборе способа регулирования скорости двигатель полностью используется в соответствии со своими возможностями во всем диапазоне ее изменения.

6. **Экономичность регулирования** определяется стоимостью регулируемых устройств и величиной суммарных потерь мощности при регулировании:

$$\Delta P = P_1 - P_2,$$

где P_1 — мощность, потребляющая из сети;

$P_2 = \omega \cdot M$ — полученная мощность на валу электродвигателя.

7. **Вес, габариты, надежность и прочее**, например, пусковые характеристики, основными из которых являются величины пускового тока и пускового момента. Они особенно существенны для асинхронных короткозамкнутых электродвигателей.

3.2. Регулирование момента и тока

При формировании заданного графика движения исполнительных органов часто бывает необходимо обеспечивать требуемое их ускорение или замедление. Это достигается регулированием прикладываемого к исполнительным органам со стороны ЭП момента или усилия.

В некоторых технологических процессах (прокатка металла, изготовление проводов и кабелей, бумажное и текстильное производства) требуется, чтобы исполнительные органы рабочих машин создавали необходимое натяжение в обрабатываемом материале или изделии. Это также обеспечивается с помощью ЭП регулированием создаваемого им момента или усилия на исполнительных органах соответствующих рабочих машин и механизмов.

В некоторых случаях требуется ограничивать момент ЭП для предотвращения поломки рабочей машины или механизма при внезапном стопорении движения исполнительного органа (например, при копании грунта, бурении скважин, заклинивании механической передачи и др.). Основными показателями для оценки того или иного способа регулирования (ограничения) момента являются точность и экономичность.

Каким же образом можно изменять момент ЭП? Для ответа на этот вопрос вспомним, что развиваемый электрическим двигателем момент пропорционален произведению магнитного потока и тока якоря, т. е.

$$M = c\Phi I, \quad (3.2)$$

где c - конструктивный коэффициент двигателя.

Таким образом, изменяя ток якоря или магнитный поток Φ , можно регулировать (ограничивать) момент. Регулирование тока и момента двигателей требу-

ется также и для обеспечения нормальной работы самих двигателей. Так, при пуске двигателей постоянного тока обычного исполнения для обеспечения нормальной работы их коллекторно-щеточного узла ток должен быть ограничен значением $3 I_{ном}$. Необходимость ограничения тока возникает и в случае пуска мощных двигателей постоянного и переменного тока, так как их большие пусковые токи могут привести к недопустимому снижению напряжения питающей сети.

Для анализа возможности регулирования тока используется электромеханическая характеристика двигателя (иногда называемая скоростной), которая представляет собой зависимость его скорости от тока $\omega(I)$. Для двигателей постоянного тока независимого возбуждения при постоянном (нерегулируемом) магнитном потоке электромеханическая характеристика повторяет механическую. Регулирование момента чаще всего производится воздействием на ток двигателя посредством изменения подводимого к нему напряжения или включения в его цепи добавочных резисторов. Отметим, что регулирование тока и момента может осуществляться только в динамическом (переходном) режиме работы ЭП, поскольку в установившемся режиме ток и момент двигателя определяются его механической нагрузкой.

На рис. 3.1, а для примера показаны типовые электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения, позволяющие регулировать (ограничивать) ток I и момент M при пуске с помощью добавочного резистора в цепи якоря. Резистор включается в цепь двигателя на период пуска (прямая 1), а затем с помощью схемы управления выводится (шунтируется) - прямая 2. Видно, что регулирование тока и момента производится ступенчато соответственно в пределах $I_1 \dots I_2$ и $M_1 \dots M_2$ и характеризуется невысокой точностью. Для повышения точности необходимо использовать несколько ступеней резисторов, в этом случае размах изменения тока I и момента M сузится. Данный способ, получивший название параметрического, характеризуется простотой реализации, но недостаточной точностью.

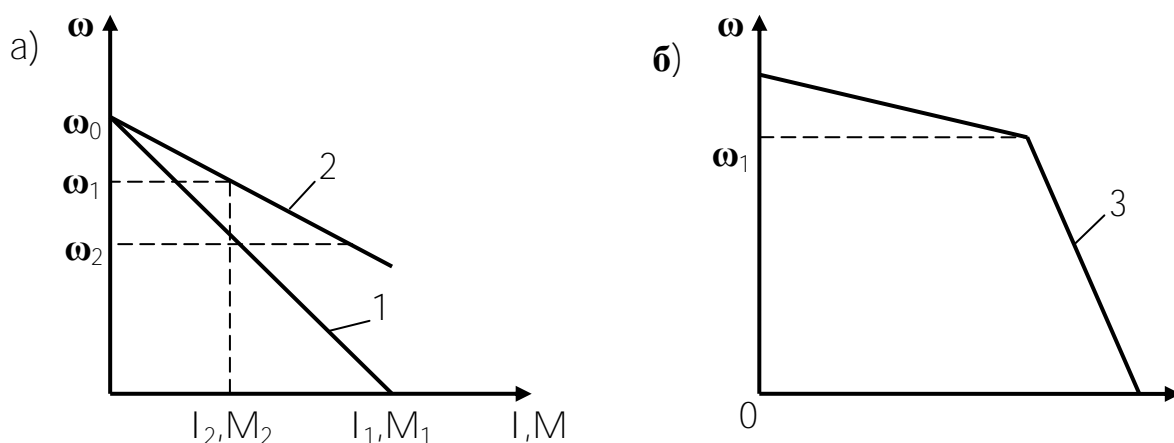


Рис 3.1. Типовые характеристики ДПТ НВ

Изображенная на рис. 3.1, б характеристика является типовой при регулировании тока и момента в замкнутой системе «преобразователь - двигатель». За счет соответствующего воздействия на двигатель с помощью преобразователя формируется близкий к вертикали участок 3 характеристики. Точность регулиро-

вания тока и момента в таких ЭП является высокой (участок 3 характеристики в пределе может быть получен в виде вертикальной линии).

3.3. Регулирование положения

Для обеспечения выполнения ряда технологических процессов требуется перемещение исполнительных органов рабочих машин и механизмов в заданную точку пространства или плоскости и их установка там (фиксирование) с заданной точностью. (Например, роботы и манипуляторы, подъемно-транспортные механизмы, клапаны, задвижки, механизмы подачи станков и ряд других). Перемещение исполнительного органа из одной точки плоскости или пространства (позиции) в другую называется позиционированием и обеспечивается соответствующим регулированием положения вала двигателя.

В тех случаях, когда не требуются высокие точность и качество движения, позиционирование обычно обеспечивается с помощью путевых или конечных выключателей. Они устанавливаются в заданных позициях и при подходе к ним исполнительного органа производят отключение ЭП. Исполнительный орган тормозится и с некоторой точностью останавливается.

При необходимости обеспечения высокой точности позиционирования формируется оптимальный (или близкий к нему) график 3 движения ЭП $\varphi(t)$ (рис. 3.2). Такой типовой график движения состоит из трех участков - разгона, движения с установившейся скоростью и торможения, и предусматривает формирование графиков 1 и 2 соответственно момента двигателя $M(t)$ и его скорости $\omega(t)$.

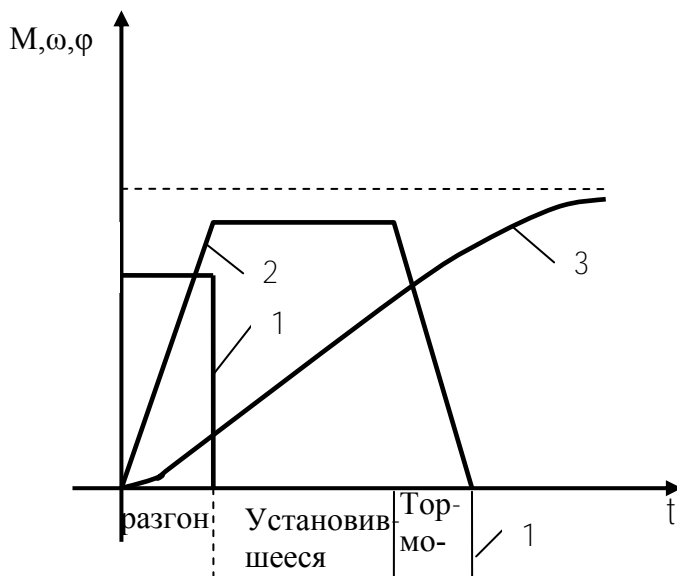


Рис 3.2. Типовой график движения ЭП

Отметим, что при небольших перемещениях участок установившегося движения может отсутствовать.

Точное позиционирование реализуется, как правило, в замкнутой системе «преобразователь - двигатель».

3.4. Структуры электропривода, применяемые при регулировании координат

В зависимости от выполняемых функций, вида и числа регулируемых координат, степени автоматизации технологических процессов реализация ЭП может быть самой разнообразной (рис. 3.3).

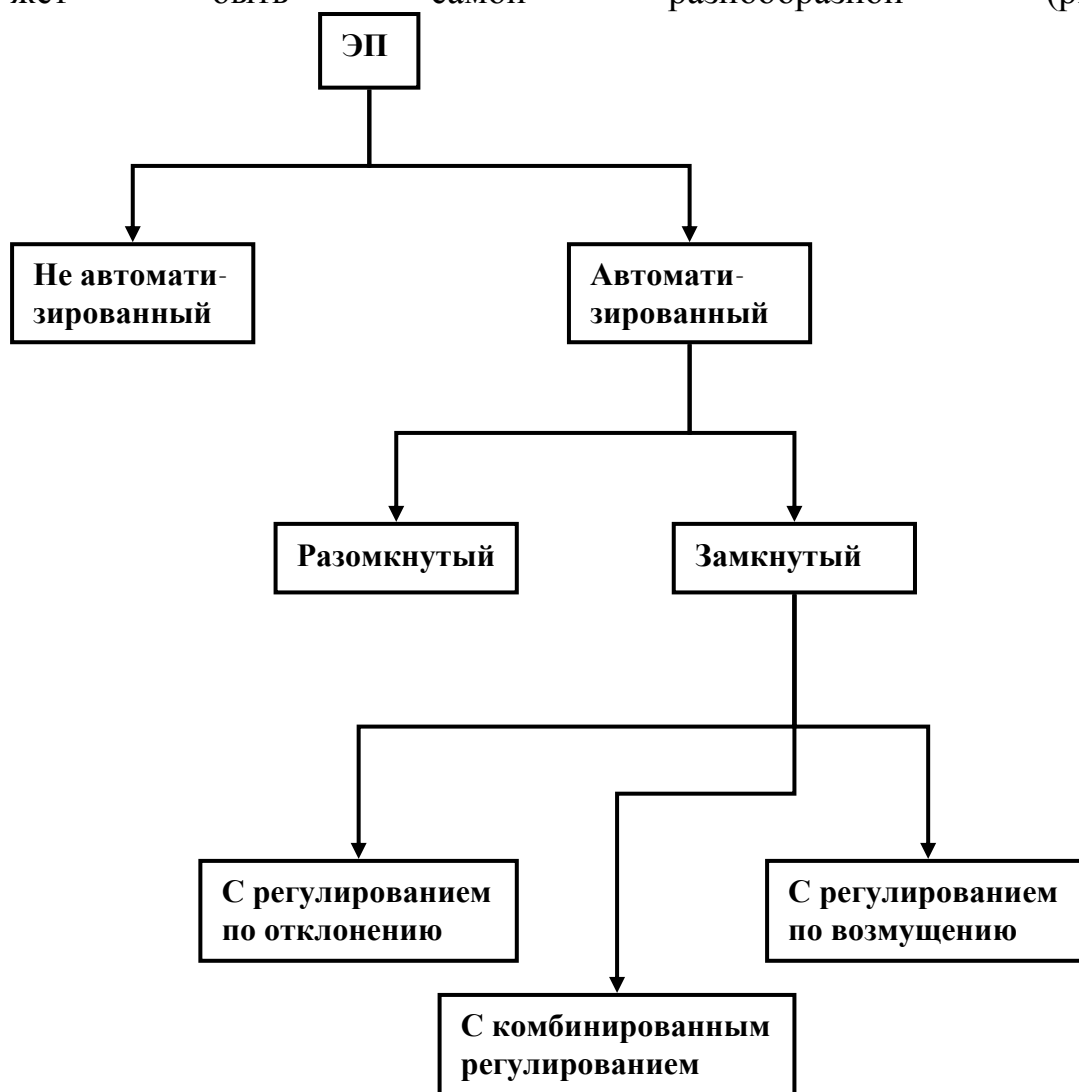


Рис 3.3. Реализация ЭП

Все ЭП делятся на неавтоматизированные и автоматизированные. *Неавтоматизированные* - это такие ЭП, управляет которыми с помощью простых средств человек (оператор). Он осуществляет пуск и остановку ЭП, изменение скорости и реверсирование в соответствии с заданным технологическим циклом. Для помощи оператору ЭП снабжен необходимыми элементами защиты, блокировок и сигнализации.

В *автоматизированном* ЭП операции управления в соответствии с требованиями технологического процесса выполняются системой управления. На оператора возлагаются функции включения и отключения ЭП, наладка и контроль его работы (отметим, что при работе ЭП в общем комплексе автоматизированного производства внешние команды поступают от управляющих устройств более высокого уровня, например АСУ производством). Очевидно, что автоматизированный ЭП является более эффективным и экономически целесообразным, он позво-

ляет освободить человека от утомительного и однообразного труда, повысить производительность рабочих машин и механизмов, а также качество выполняемых ими технологических процессов и операций. Именно по этой причине в теории ЭП и в настоящем учебнике основное внимание уделяется рассмотрению автоматизированных ЭП.

Все автоматизированные ЭП подразделяются, в свою очередь, на разомкнутые и замкнутые. Работа *разомкнутого* ЭП характеризуется тем, что все внешние возмущения (например, момент нагрузки M_c) влияют на его выходную координату, например скорость. Другими словами, разомкнутый ЭП не защищен от влияния внешних возмущений и поэтому не может обеспечить высокого качества регулирования координат, хотя и отличается простой схемой. Разомкнутые ЭП обычно применяются для обеспечения пуска, торможения или реверса двигателей. В таких схемах ЭП используется информация о текущих значениях скорости, времени, тока (момента) или пути, что позволяет автоматизировать указанные процессы.

Замкнутый ЭП, как и любая система автоматического регулирования, может быть реализован либо по принципу отклонения с использованием обратных связей, либо по принципу компенсации внешнего возмущения. Основным отличительным признаком замкнутого ЭП является полное или частичное устранение влияния внешнего возмущения на регулируемую координату, например, скорость такого ЭП может оставаться практически неизменной при возможных колебаниях момента нагрузки. В силу этого обстоятельства замкнутые ЭП обеспечивают более качественное управление движением исполнительных органов, хотя их схемы оказываются более сложными.

Для реализации *принципа компенсации* возмущающего воздействия дополнительный сигнал, пропорциональный возмущению, подается на вход ЭП вместе с сигналом задания. В результате суммарный сигнал обеспечивает такое управление ЭП, при котором осуществляется компенсация внешнего воздействия и устранение тем самым его влияния на регулируемую координату. Несмотря на все достоинства, этот способ не нашел широкого применения в ЭП из-за сложности реализации датчиков возмущающих воздействий, в частности момента нагрузки M_c .

Особенностью ЭП, построенного по *принципу отклонения*, является наличие цепи обратной связи. Информация о регулируемой координате подается на вход ЭП в виде сигнала обратной связи, который сравнивается с задающим сигналом, и полученный результирующий сигнал (его называют сигналом рассогласования, отклонения или ошибки) является управляющим сигналом для ЭП. Если под влиянием возмущающего воздействия начинает изменяться регулируемая координата, то за счет выбора направления и силы воздействия обратной связи произойдет соответствующее изменение режима работы ЭП и полное или частичное восстановление ее уровня, т. е. в таких системах регулирование ведется с учетом результата регулирования.

В замкнутых ЭП применяются все возможные виды обратных связей - положительные и отрицательные, линейные и нелинейные, жесткие и гибкие, а также реализуемые по виду регулируемой координаты - скорости, току, положению и др. В замкнутых ЭП могут использоваться несколько обратных связей по числу регулируемых координат. ЭП с обратными связями являются в настоящее время

самыми распространенными системами, поскольку позволяют качественно и технически просто обеспечивать всю совокупность выполняемых ими функций. В некоторых случаях при очень высоких или специфических требованиях к качеству управления движением исполнительных органов создаются замкнутые комбинированные ЭП, в которых используются оба принципа управления.

Тема 4. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

4.1. Общие сведения

Электродвигатель как электромеханический преобразователь энергии является основой силовой части электропривода (ЭП). Динамические и статические свойства ЭП в значительной мере определяются электромеханическими свойствами ЭД, входящего в состав ЭП.

В ЭП используются двигатели постоянного тока независимого (ДПТ НВ), последовательного (ДПТ ПВ) и смешанного (ДПТ СВ) возбуждения, а также двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, которые по своим характеристикам близки к ДПТ НВ.

Электроприводы с ДПТ НВ являлись до недавнего времени основным видом регулируемого электропривода. Созданные на базе системы «управляемый выпрямитель - двигатель» (УВ - Д) замкнутые ЭП обеспечивают регулирование координат движения ИО РМ и механизмов во всех режимах работы с высокими показателями качества.

Электротехническая промышленность выпускает двигатели постоянного тока основной общепромышленной серии 2П в диапазоне мощностей от 0,13 до 200 кВт различного конструктивного исполнения и с разными способами вентиляции, предназначенные в первую очередь для работы в регулируемых ЭП. В частности, эти двигатели имеют встроенный датчик скорости - тахогенератор и ориентированы на питание от тиристорных преобразователей.

Усовершенствование двигателей постоянного тока привело к разработке новой серии 4П, рассчитанной на напряжения 110 и 220 В, со скоростями вращения от 750 до 3000 об/мин и номинальными моментами от 2 до 15 000 Н·м с улучшенными удельными энергетическими показателями, динамическими и виброакустическими свойствами. Кроме того, трудоемкость их изготовления по сравнению с серией 2П снижена в 2,5...3 раза при уменьшении расхода меди на 25...30%.

Для ЭП ряда рабочих машин и механизмов выпускаются специализированные серии ДПТНВ. Для ЭП металлорежущих станков помимо серий 2П и 4П применяются двигатели серий ПБСТ и ПГТ (с гладким якорем), а также высокомоментные двигатели серий ПБВ, ДК1 и ДК2 с возбуждением от постоянных магнитов.

Для крановых механизмов выпускаются двигатели серии Д с независимым и последовательным возбуждением, исполнение которых максимально учитывает условия их работы и предъявляемые к ним требования. Для краново-металлургических ЭП применяются также двигатели с независимым, последовательным и смешанным возбуждением серий ДП.

Специализированные серии ДПТ выпускаются и для металлургического производства (например, прокатные двигатели серий НП и ПП), текстильной промышленности и ряда других отраслей народного хозяйства.

4.2. Механические характеристики электродвигателей переменного тока

Устройство асинхронных электродвигателей. Асинхронные электродвигатели состоят из двух основных частей: статора (неподвижная часть) и ротора (вращающаяся часть). В зависимости от конструкции ротора они делятся на двигатели с короткозамкнутым и с фазным ротором.

Статор состоит из корпуса 4 (рис. 4.1, *а*), магнитопровода 1 и обмотки 2. Корпус выполняют в двигателях небольшой мощности литым из чугуна, стали или алюминиевого сплава, в мощных двигателях – сварным. По торцам к корпусу крепят подшипниковые щиты. Магнитопровод набирают из колец, отштампованных из листовой электротехнической стали. На внутренней поверхности магнитопровода имеются пазы, в которые закладывается трехфазная обмотка статора, представляющая собой симметричную систему из трех обмоток фаз. Начала первой, второй и третьей обмоток фаз обозначают соответственно С1, С2 и С3, а концы их – С4, С5 и С6. Выводы обмоток фаз присоединяют к зажимам коробки выводов 3, что позволяет соединять обмотки в звезду или в треугольник и благодаря этому подключать двигатель в сеть с различным напряжением, например 380 или 220 В.

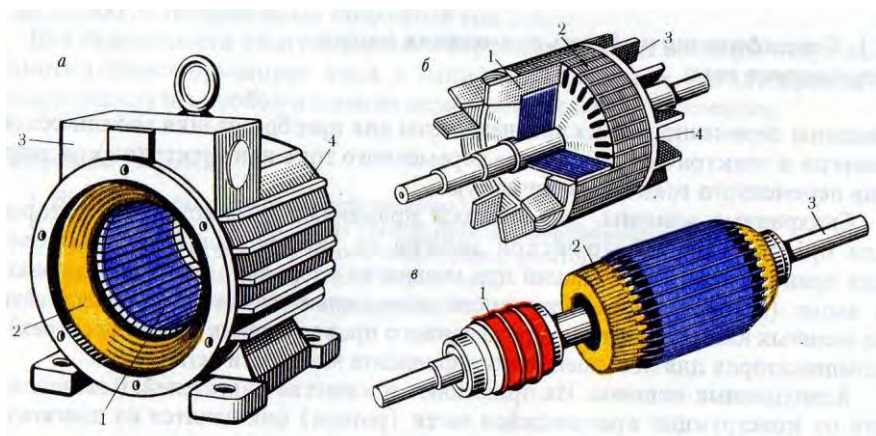


Рис. 4.1. Конструкция асинхронных двигателей

В статоре двигателя с фазным ротором на одном из подшипниковых щитов имеется щеточное устройство.

Ротор состоит из магнитопроода, набранного из листовой электротехнической стали, обмотки и вала. Обмотку короткозамкнутого ротора изготавливают обычно заливкой магнитопровода ротора расплавленным алюминием, который при заполнении пазов магнитопровода 2 (рис. 4.1, *б*) образует стержни 1 обмотки. Одновременно образуются короткозамыкающие кольца 4 и вентиляционные лопатки 3. Обмотку 2 фазного ротора (рис. 4.1, *в*) выполняют изолированным проводом, располагаемым в пазах магнитопровода, аналогично обмотке статора. Концы обмоток фаз соединяют между собой, а начала, обозначаемые Р1, Р2 и Р3, присоединяют к расположенным на валу 3 контактными кольцам 1.

Механические характеристики асинхронных электродвигателей. Асинхронные электродвигатели нашли широкое применение в промышленности благодаря простоте конструкции, надежности и экономичности в эксплуатации, ми-

нимальной стоимости и возможности питания от электрической сети переменного тока.

Схема асинхронного электродвигателя с *короткозамкнутым ротором* приведена на рис. 4.2¹, а, с *фазным ротором* – на рис. 4.2¹, в, а соответствующие им механические характеристики в двигательном режиме на рис. – 4.2¹, б и г.

Вращающий момент M (Н·м) на валу двигателя, угловая скорость ω (рад/с), частота вращения n (об/мин) его вала и мощность P (Вт), развиваемые двигателем, связаны известными соотношениями

$$P = M \omega; \quad \omega = \pi n / 30.$$

Угловая скорость ω_0 и частота вращения n_0 магнитного поля статора, называемые **синхронными**, будут:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= 2\pi f_1 / p; \\ n_0 &= 60 f_1 / p, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где f_1, p – соответственно частота сети и число пар полюсов.

Принцип действия асинхронного электродвигателя заключается в следующем. Трехфазный ток, протекающий по обмотке статора, создает вращающееся магнитное поле с частотой вращения n_0 (или угловой скоростью ω_0). Это поле, пересекая обмотки статора и ротора, индуцирует в них ЭДС. ЭДС статора и падение напряжения в обмотке статора уравнивают приложенное напряжение питающей сети. Под действием ЭДС ротора в замкнутых его обмотках протекают токи. Эти токи (по закону Ленца) стремятся своим магнитным полем ослабить вызвавшее их магнитное поле статора. Механическое взаимодействие токов ротора с вращающимся магнитным полем статора приводит к тому, что ротор станет вращаться в ту же сторону, в какую вращается магнитное поле статора (в этом можно убедиться, применив *правило левой руки*).

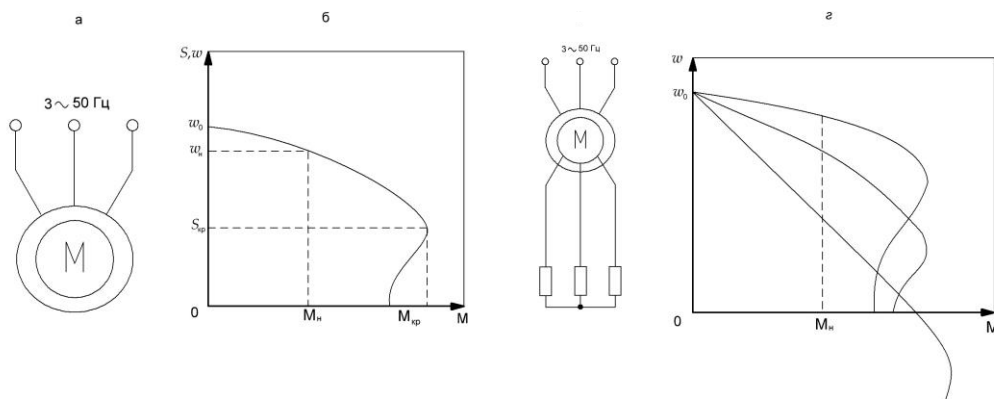


Рис. 4.2¹. Схемы и механические характеристики асинхронных двигателей

Особенностью асинхронного двигателя является отставание ротора от магнитного поля статора, которое выражается скольжением:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad \text{или} \quad s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot 100 \% . \quad (4.2)$$

Двигатель называется *асинхронным* потому, что его ротор вращается *не синхронно* с вращающимся магнитным полем статора: скорость ротора ω не может равняться ω_0 , так как при их равенстве вращающееся поле не пересекало бы об-

мотку ротора, в ней отсутствовали бы токи и ротор не испытывал бы вращающего момента.

Наибольшую мощность P_n , с которой может работать двигатель в нормальном для него режиме, называют **номинальной мощностью**. Соответствующие этой мощности значения тока I_n , частоты вращения n_n , скольжения S_n называют **номинальными значениями** данных величин. Номинальное скольжение асинхронного двигателя составляет 1,5...7 % (меньшие значения относятся к двигателям большей мощности).

Электромагнитный вращающий момент асинхронного двигателя, как и любой электрической машины, пропорционален магнитному потоку Φ и активной составляющей вторичного тока (тока ротора)

$$M = k\Phi / 2 \cos\varphi_2, \quad (4.3)$$

где k – конструктивный коэффициент.

Скольжение s_k , при котором момент двигателя имеет максимальное (критическое) значение, называется **критическим**:

$$s_k \approx R_2' / X_k, \quad (4.4)$$

где R_2' – активное сопротивление фазы ротора, приведенное к частоте и напряжению статора;

X_k – индуктивное сопротивление цепи короткого замыкания ($X_k = X_1 + X_2'$).

Величина критического момента M_k определяет перегрузочную способность электродвигателя. У асинхронных короткозамкнутых электродвигателей нормального исполнения кратность критического момента $\lambda_k = M_k / M_n = 1,8...2,5$, у двигателей краново-металлургической серии $\lambda_k = 2...3,5$. Величина критического момента пропорциональна квадрату напряжения в сети U_1 :

$$M_k = 3U_1^2 / (2\omega_0 X_k). \quad (4.5)$$

В сетях промышленных предприятий напряжение может изменяться, например, при пуске мощных двигателей, при ударных нагрузках, характерных для прокатных станов. Поэтому наибольшая допустимая перегрузка с учетом возможности снижения напряжения в сети на 10 % принимается $\lambda = 0,9^2 \lambda_k$.

Уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя имеет вид (упрощенная формула Клосса)

$$M = 2M_k / (s/s_k + s_k/s). \quad (4.6)$$

По данной формуле, зная значения M_k и s_k , можно рассчитать соответствующие значения момента M для разных положительных и отрицательных значений s (в том числе и значений $s < 1$), а затем построить по ним механическую характеристику.

В каталогах обычно приводят следующие технические данные асинхронного двигателя: P_n (кВт), n и n_0 (об/мин), λ_k и $\lambda_n = M_n / M_n$ (M_n – пусковой момент). По этим данным можно определить значения всех величин, необходимых для расчета и определения механических характеристик по (4.6), из выражений $\omega_n = \pi n_n / 30$, $\omega_0 = \pi n_0 / 30$, $M_n = P_n / \omega_n$; $M_k = \lambda_k M_n$; $s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}$; $s_k \approx \frac{s_n}{\lambda_k} \left(\lambda_k (\lambda_k + \lambda_n^2 \sqrt{\lambda_k^2 - 1}) \right)$.

Из рис. 4.2' видно, что верхний (рабочий) участок естественной механической характеристики обладает большой жесткостью β ($\beta = dM/ds$). Увеличение

сопротивления в цепи ротора (рис. 4.2', з) приводит к увеличению критического скольжения S_k , а критический момент M_k остается неизменным, т. е. жесткость искусственных механических характеристик уменьшается с увеличением активного сопротивления в цепи ротора.

Активное сопротивление фазы обмотки ротора можно определить по формуле

$$R_2 = \frac{E_{2H} S_H}{\sqrt{3} I_{2H}}, \quad (4.7)$$

где E_{2H} , I_{2H} – соответственно фазная ЭДС и номинальный ток обмотки ротора (находят по каталогу).

Асинхронный двигатель может работать во всех **трех** известных тормозных режимах.

Рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть можно получить, если к валу асинхронного двигателя, подключенного к сети, приложить добавочный момент по направлению вращения такой величины, чтобы ротор стал вращаться со скоростью выше синхронной ($\omega > \omega_0$). При этом скольжение будет отрицательным $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0 < 0$. В данном случае относительное движение проводников ротора в поле статора по сравнению с двигательным режимом изменится на обратное. Следовательно, изменится направление ЭДС в проводниках ротора и соответственно ток ротора, который, взаимодействуя с полем статора, создает электромагнитный момент и будет выполнять роль тормоза. Вырабатываемая при этом активная электрическая энергия в обмотке статора поступает в сеть. Такой режим торможения можно получить, например, в подъемных установках при опускании тяжелых грузов, в эскалаторах метро при спуске с большим количеством пассажиров и других установках с активным статическим моментом на валу электродвигателя. Активная мощность к тому же изменяет знак, т.е. электрическая машина работает генератором, преобразуя кинетическую энергию от активного момента (опускающегося груза и др.) в электрическую и отдавая ее в сеть. Переход работы из двигательного режима в генераторный происходит автоматически, поэтому механические характеристики являются продолжением характеристик двигательного режима и располагаются во II и IV квадратах (рис. 4.3, линии с двумя засечками).

В режиме **торможения противовключением** ротор вращается в сторону, противоположную направлению вращения магнитного поля статора, скольжение становится больше единицы:

$$S = [\omega_0 - (-\omega)]/\omega_0 = 1 + \omega/\omega_0$$

и ток ротора превышает ток короткого замыкания.

Для ограничения величины тока в цепь ротора вводят ступень реостата. Механические характеристики в данном режиме торможения являются продолжением характеристик двигательного режима (при $s > 1$ или $\omega < 0$) и располагаются во II и IV квадратах (рис. 4.3, линии с четырьмя засечками). Таким образом, ротор двигателя, включенного на подъем, вращается в противоположную сторону, так как в цепь ротора введено большое сопротивление и момент электродвигателя достигает момента сопротивления лишь при отрицательном скольжении (на рис. 4.3, точка Б). Такой режим часто используется в металлургических кранах при спуске грузов в тормозном режиме.

Торможение **противовключением** может осуществляться реверсом магнитного поля статора (переменой мест двух фаз статора). Одновременно в цепь ротора

вводится ступень реостата, ограничивающая ток и увеличивающая тормозной момент. На рис. 4.3 показан график перехода асинхронного двигателя с фазным ротором в режиме торможения *противовключением*. В точке 1 двигательного режима осуществляется реверс и двигатель переходит на работу в точку 2, по линии 2–3 осуществляется интенсивное торможение *противовключением*. В точке 3 двигатель останавливается и его необходимо отключить от сети, иначе он начнет вращаться в противоположном направлении.

В режиме *динамического торможения* двигатель отключают от сети переменного тока и две фазы обмотки статора подключают к источнику постоянного тока. В статоре создается неподвижное в пространстве магнитное поле, которое индуцирует в обмотках вращающегося ротора ток. Взаимодействие его с неподвижным полем статора создает тормозной момент. На рис. 4.3 показаны механические характеристики в этом режиме при различных значениях сопротивления цепи ротора (линии с тремя засечками).

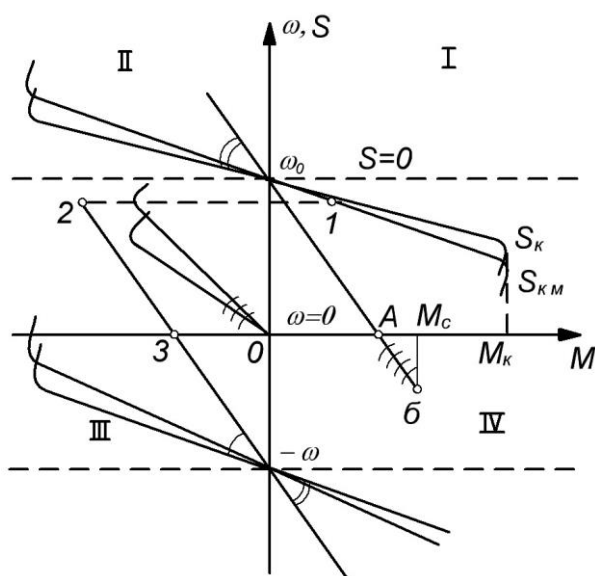


Рис. 4.3. Совмещенные механические характеристики асинхронной машины

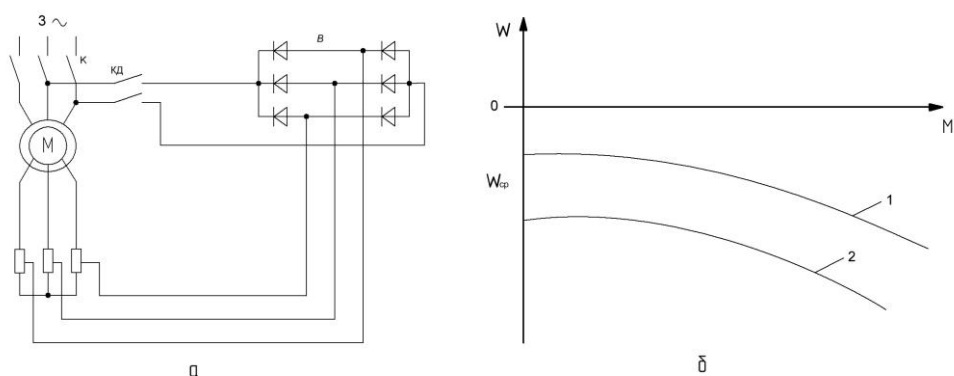


Рис. 4.4. Схема (а) и механические характеристики (б) асинхронного двигателя при динамическом торможении с самовозбуждением

На рис. 4.4 представлена схема осуществления динамического торможения с самовозбуждением, когда для возбуждения используется выпрямленное напряже-

ние обмотки ротора. Условие самовозбуждения наступает лишь при определенном граничном значении угловой скорости $\omega_{гр}$, которое зависит от суммарного сопротивления фазы ротора. Таким образом, в интервале от 0 до $\omega_{гр}$ условие самовозбуждения отсутствует, а механическая характеристика (рис. 4.4, б) совпадает с осью ординат. При $\omega = \omega_{гр}$ двигатель само-возбуждается и его момент быстро увеличивается до значения, определяемого моментом нагрузки на валу. Увеличение сопротивления роторной цепи приводит к возрастанию $\omega_{гр}$ (рис. 3.4, кривая 2). Механические характеристики имеют достаточно высокую жесткость, что позволяет получать низкие устойчивые скорости спуска грузов. Достоинством этого режима торможения является экономичность, поскольку при спуске груза энергия из сети не потребляется.

Пуск асинхронных электродвигателей. Пусковые свойства асинхронных двигателей (АД) характеризуются кратностью пускового момента $M_{п.}/ M_{ном}$, кратностью пускового тока $I_{п.}/ I_{ном}$, а также сложностью и экономичностью пуска. Начальный пусковой ток превышает номинальный в 6 – 10 раз, так как в момент пуска скорость пересечения вращающимся полем проводников ротора и ЭДС ротора имеют наибольшие значения. Поэтому ток ротора и индуктивно связанный с ним ток статора возрастут. По мере разгона двигателя ЭДС ротора и токов ротора и статора уменьшаются.

При пуске АД меняется также и частота тока в роторе, которая, как и ЭДС ротора, пропорциональна разности скоростей вращения поля статора и ротора. В начальный момент пуска частота тока в роторе f_2 равна частоте тока в статоре (т.е. частоте сети f_1). При разгоне двигателя частота f_2 уменьшается в соответствии с выражением $f_2 = f_1 \cdot S$. Одновременно с частотой пропорционально скольжению S меняется и индуктивное сопротивление ротора. В начальный момент пуска при наибольшем индуктивном сопротивлении ротора оно преобладает над активным сопротивлением и $\cos \varphi_2$ имеет малое значение. Поэтому, несмотря на большой пусковой ток, начальный пусковой момент АД мал.

Пуск АД с короткозамкнутым ротором осуществляется в основном *непосредственным включением их в сеть (это так называемый прямой пуск)*. Большой пусковой ток при редких пусках не вызывает опасного перегрева обмоток, так как время его действия незначительно. Однако при пуске мощных двигателей, соизмеримых по мощности с питающим трансформатором, в момент пуска наблюдается резкое снижение напряжения в сети, которое может неблагоприятно отразиться на работе других электроприемников. Такое снижение напряжения происходит, например, в сети участка шахты при пуске двигателя комбайна.

Если питающая сеть недостаточно мощная, применяется пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором *при пониженном напряжении* с помощью реактора (индуктивная катушка) L или автотрансформатора (рис. 4.5). При реакторном пуске сначала замыкается линейный контактор КМ1, а после разгона двигателя – контактор КМ2, а КМ1 отключается. При автотрансформаторном пуске сначала включаются контакторы КМ1 и КМ3, а после разгона двигателя КМ1 и КМ3 отключаются, а контактор КМ2 включает двигатель на полное напряжение сети.

При понижении напряжения на двигателе во время пуска уменьшается пусковой ток. Недостатком такого способа является одновременное уменьшение пускового момента, причем при снижении напряжения, например в 2 раза, пусковой ток уменьшится также в 2 раза, а пусковой момент – в 4 раза. Поэтому пуск при пониженном напряжении можно применять только для двигателей, приводящих во вращение рабочие машины, для которых не нужен большой пусковой момент (центробежные насосы, вентиляторы и др.).

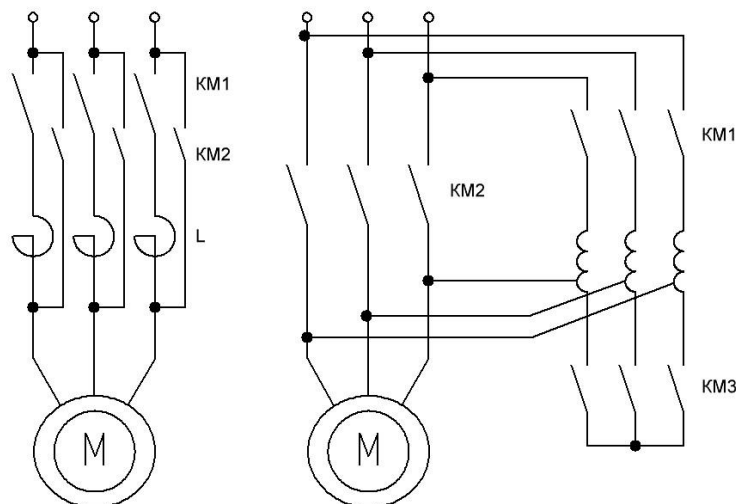


Рис. 4.5. Схемы пуска АД с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении

Пуск АД с фазным ротором. Для ограничения бросков тока и одновременного повышения пускового момента пуск АД с фазным ротором, особенно средней и большой мощности, осуществляется через специальное пусковое устройство. Простейшее из них – пусковой реостат (рис. 4.6, а), секции которого изготовляют из стали, чугуна, хрома, фехраля и других сплавов с повышенным сопротивлением. По мере разгона двигателя реостат выводится ступенями (рис. 4.5, б). Естественная (т.е. при закороченной обмотке ротора - выведенном пусковом реостате) механическая характеристика показана на рис.4.5, б кривой 4. Начальный пусковой момент составляет $(0,7 \dots 0,8) M_{\text{ном}}$, а пусковой ток равен $(8 \dots 10) I_{\text{ном}}$. Для увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока в цепь ротора через контактные кольца и щетки ХА (рис. 4.5, а) включают пусковой реостат с активным сопротивлением. При этом увеличивается критическое скольжение и характеристики смещаются (кривые 1, 2 и 3). Пусковой реостат состоит из нескольких ступеней ($R1, R2, R3$), причем полное сопротивление реостата принимают таким, чтобы $S_{\text{кр}} = 1$, а $M_{\text{п}} = M_{\text{мах}}$.

Для пуска включают контактор К при полностью введенном реостате. Двигатель начинает разгоняться по характеристике 1 от точки а. Момент двигателя при разгоне уменьшается. Если не производить переключений, двигатель разгонится до точки к ($M = M_{\text{ст}}$). Однако ранее, чем это произойдет, при $M = M_{\text{пер}} = (1,1 \dots 1,2) M_{\text{ст}}$ (точка б) включают контактор К1, который закорачивает ступень R1 роторного реостата. В результате ток и момент увеличиваются и двигатель переходит в точку с на характеристике 2. Далее процесс пуска происходит аналогично, и после замыкания последней ступени R3 пускового реостата двигатель выходит на есте-

ственную характеристику 4 (точка g) и разгоняется по ней до точки h , в которой $M = M_{ст}$.

В современных промышленных установках пусковой реостат имеет 5 – 7 ступеней, которые выводятся автоматически.

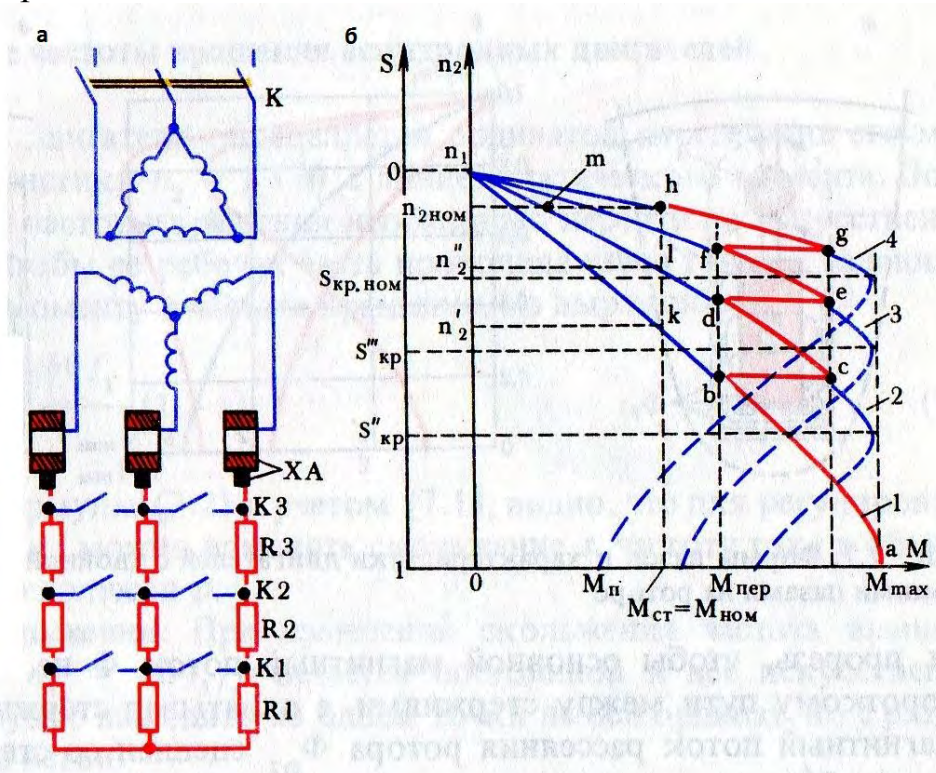


Рис. 4.6. Электрическая схема АД с фазным ротором (а) и графики пусковых характеристик (б)

Расчет пусковых реостатов. Для расчета пусковых реостатов используют различные методы. Целью расчета является определение величин сопротивлений каждой пусковой секции (и ступеней) и всего реостата в целом. После этого производится выбор пускового реостата из стандартных элементов (ящиков).

Рассмотрим *аналитический метод* расчета пускорегулировочных и тормозных сопротивлений асинхронного двигателя с фазным ротором [1].

Механические характеристики АД в рабочем диапазоне изображаются линейными зависимостями, т.е. в относительных единицах

$$v = 1 - \rho \cdot \mu, \quad (4.8)$$

где $v = \omega / \omega_0$; $\mu = M / M_H$; $\rho = R_{2\Sigma} / R_H$; $R_H = U_{2H} / (\sqrt{3} \cdot I_{2H})$;

ω_0 – синхронная угловая скорость;

$R_{2\Sigma}$ – суммарное активное сопротивление фазы ротора, состоящее из собственного сопротивления фазы ротора $R_{2.0}$ и сопротивлений включенных секций пускового реостата;

I_{2H} – номинальный ток ротора;

U_{2H} – номинальная линейная ЭДС ротора.

Пусковой реостат рассчитывается таким образом, чтобы при пуске электромагнитный момент АД находился в пределах от μ_1 до μ_2 , при этом отношение моментов

$$\lambda = \mu_1 / \mu_2 = \rho_n / \rho_{n-1} = \dots = \rho_2 / \rho_1 = \rho_1 / \rho_e,$$

где $\rho_e = R_{2.0} / R_H = S_H$.

Тогда $\rho_n = \rho_e \lambda^n = \lambda^n \cdot S_H$, (4.9)
 где n – число ступеней пускового реостата.

В начальный момент пуска $v = 0$, $\rho = \rho_n$, $\mu = \mu_1$. Подставляя эти значения в уравнение (4.8) и решая его относительно ρ_n , получим $\rho_n = 1/\mu_1$. Теперь решая (4.9) относительно λ при $\rho_n = 1/\mu_1$, получим соотношение, связывающее числа λ , μ_1 , n и S_H :

$$\lambda = \sqrt[n]{1/(\mu_1 \cdot S_H)}. \quad (4.10)$$

При расчетах обычно задаются величиной $\mu_1 = (0,8 - 0,9) \lambda_K$ и числом пусковых ступеней $n = (3 - 5)$, вычисляют отношение моментов

$$\lambda = \sqrt[n]{1/(\mu_1 \cdot S_H)}$$

и находят $\mu_2 = \mu_1 / \lambda$.

Таким образом, относительные значения сопротивлений пусковых ступеней будут равны (рис. 4.7):

$$\rho_1 = \rho_e \lambda = S_H \lambda; \rho_2 = S_H \lambda^2; \dots; \rho_n = S_H \lambda^n. \quad (4.11)$$

Сопротивления секций реостата вычисляются таким образом:

$$\rho_{с.1} = (\lambda - 1) S_H; \rho_{с.2} = \lambda (\lambda - 1) S_H; \dots \rho_{с.n} = \lambda^{n-1} (\lambda - 1) S_H.$$

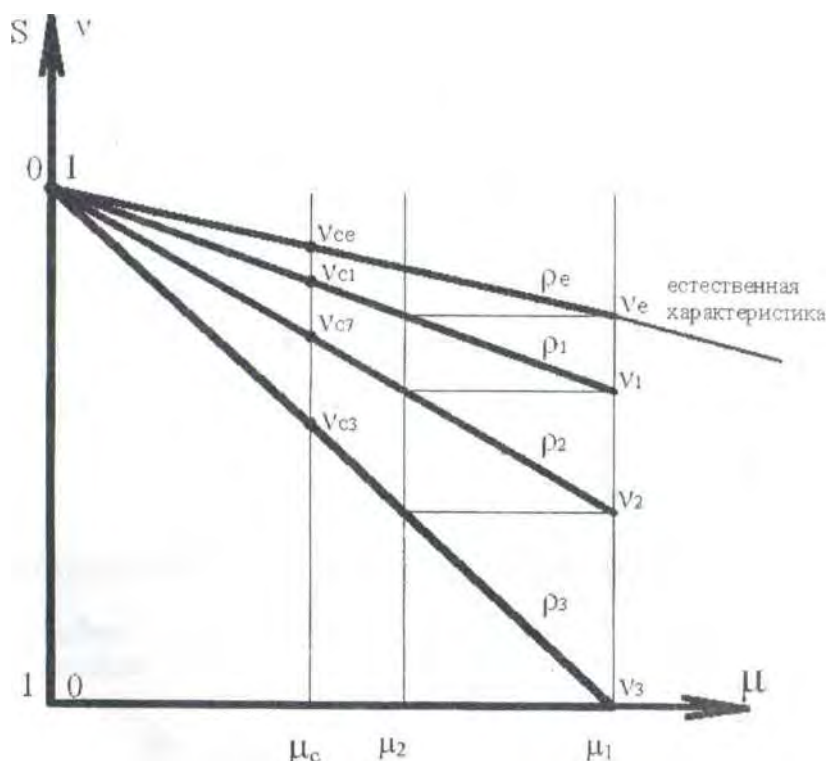


Рис. 4.7 . Механические характеристики АД с фазным ротором при пуске в 3 ступени

Однако можно использовать и **графический метод расчета** [7]. Он основан на использовании аналитического выражения (4.2) механических характеристик АД, приближенно считая их в рабочей части линейными, и состоит в следующем. Вначале строят естественную механическую характеристику двигателя, рассчитанную по формуле Клосса, (рис. 4.8). Затем задаются моментами при пуске: наибольшим $M_1 = (0,8 - 0,9) M_K$ и моментом переключения $M_{пер}$, величина которого зависит от числа ступеней реостата, но должна быть всегда больше M_c . Из то-

чек M_1 и $M_{пер}$ проводят две вертикальные линии до пересечения с естественной механической характеристикой (точки $a, б$). Через эти две точки проводят прямую до пересечения с горизонталью $s = 0$ (точка t). Из точки t проводят луч $t-i$ и из полученной точки k на вертикали $M_{пер}$ проводят горизонталь $k-g$. Аналогично из точки t проводят лучи $t-q, t-e, t-c, t-a$ и из точек h, f, d проводят горизонтали $h-e, f-c, d-a$. Последняя горизонталь должна попасть в точку a . В противном случае все графическое построение следует произвести вновь, изменив в нужном направлении момент $M_{пер}$ (уменьшив его или увеличив).

Сопротивления ступеней пускового реостата затем определяют по выражениям:

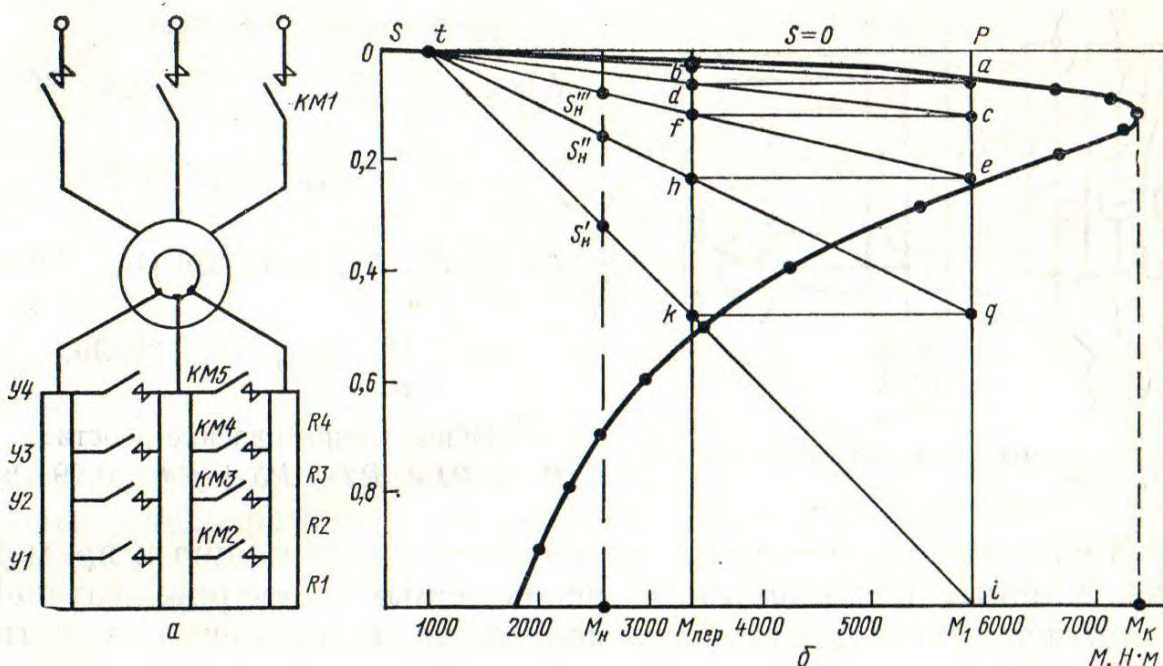


Рис. 4.8. К расчету пускового реостата

$$R1 = q-i / p-a \cdot R_{рот}; \quad R2 = e-g / p-a \cdot R_{рот}; \quad R3 = c-e / p-a \cdot R_{рот}; \quad R4 = a-c / p-a \cdot R_{рот}.$$

Величину собственного активного сопротивления фазы ротора $R_{рот}$ определяют из выражения $R_{рот} = E_{2н} S_n / (\sqrt{3} I_{2н})$, где $E_{2н}$, $I_{2н}$ — соответственно номинальная линейная ЭДС и номинальный ток обмотки ротора.

Общее сопротивление ступеней пускового реостата

$$R_{п} = R1 + R2 + R3 + R4.$$

Реверсирование асинхронных электродвигателей. Реверсирование, т.е. изменение направления вращения, производится путем реверсирования вращающегося магнитного поля статора. Для этого надо изменить на обратный порядок следования фаз А, В, С сети по отношению к обмоткам фаз статора, поменяв местами на зажимах двигателя или магнитного пускателя провода любых двух фаз.

Регулирование скорости асинхронных электродвигателей. Способы регулирования скорости асинхронного электропривода определяются из анализа уравнения механической характеристики асинхронного двигателя:

$$M = 3(U_{\phi})^2 R_{2\Sigma} / [\omega_0 s (R_1 + R_{2\Sigma}/s)^2 + X_k^2] \quad (4.12)$$

и формулы угловой скорости вращения поля статора

$$\omega_0 = 2 \pi f_1 / p, \quad (4.13)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети;
 $R_{2\Sigma}$ – приведенное к статору сопротивление роторной цепи;
 R_1 – сопротивление обмотки статора;
 f_1 – частота сети;
 ρ – число пар полюсов;
 s – скольжение;
 X_k – реактивное сопротивление короткого замыкания.

Изменением числа пар полюсов обеспечивается ступенчатое регулирование синхронной угловой скорости двигателя ω_0 . Такой способ регулирования скорости может быть реализован только при использовании специальных АД, получивших название *многоскоростных*. Особенность этих АД состоит в том, что их каждая фаза статорной обмотки имеет две одинаковые секции (полуобмотки). За счет разных схем их соединения можно изменять число пар полюсов p АД. Ротор многоскоростных АД обычно выполняется короткозамкнутым.

Так как число пар полюсов АД может принимать только дискретные значения ($p = 1, 2, 3, 4, \dots$), то и скорость АД этим способом может регулироваться лишь ступенчато.

Наиболее часто на практике применяются две схемы переключения статорной обмотки многоскоростных АД: с треугольника на двойную звезду и со звезды на двойную звезду. Схема, в которой фазы статорной обмотки образованы двумя параллельно включенными секциями, получила название двойной звезды. Схему переключения «звезда – двойная звезда» целесообразно применять при постоянном моменте нагрузки M_c , а схему «треугольник – двойная звезда» – при нагрузке, имеющей характер постоянной мощности. Помимо двухскоростных АД применяются также трех- и четырех-скоростные. Первые из них кроме переключаемой обмотки статора имеют также и одну непереключаемую обмотку. Четырехскоростные АД имеют две переключаемые обмотки статора с различным числом пар полюсов.

Рассматриваемый способ регулирования скорости АД характеризуется рядом положительных показателей, что определяет широкое его применение в регулируемом электроприводе переменного тока. К ним прежде всего следует отнести экономичность, так как регулирование скорости не сопровождается выделением в роторной цепи дополнительных потерь энергии, вызывающих излишний нагрев АД и ухудшающих его КПД. Недостатком способа является ступенчатость изменения скорости двигателя и относительно небольшой диапазон ее регулирования, не превышающий обычно 6...8.

При регулировании скорости *введением реостата в цепь ротора* вся энергия скольжения выделяется в виде потерь в цепи двигателя. Недостатки способа: уменьшение стабильности скорости при ее снижении, ступенчатость и относительно малый диапазон регулирования (2 : 1). Данный метод нашел широкое применение в металлургических кранах из-за простоты и малой стоимости применяемой аппаратуры.

Благодаря разработке и внедрению надежных тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) стало широко применяться *частотное управление* асинхронными электроприводами. Достоинства метода: регулирование производится при малых потерях скольжения, плавное регулирование скорости, возможность применения асинхронных короткозамкнутых двигателей, диапазон регулирования до 100 : 1.

Регулирование скорости асинхронного привода *изменением питающего напряжения* осуществляется путем включения по встречно-параллельной схеме в каждую фазу статора двух тиристоров (рис. 4.9, а). Изменяя угол регулирования тиристоров, можно плавно регулировать величину подводимого к статору напряжения. При этом снижается критический момент двигателя и увеличивается наклон механических характеристик, так как вращающий момент двигателя пропорционален квадрату напряжения фазы статора (рис. 4.9, б). Практически этот метод регулирования находит применение лишь для двигателей с фазным ротором в замкнутых системах управления с тиристорными регуляторами напряжения.

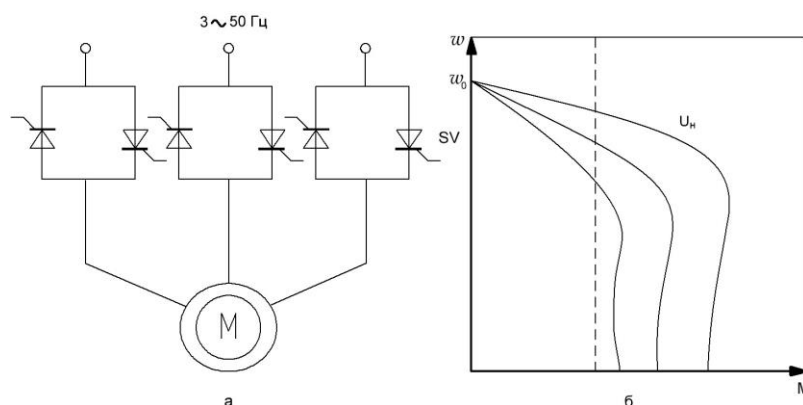


Рис. 4.9. Бесконтактное регулирование напряжения асинхронного двигателя

Электромеханические свойства синхронных двигателей. Синхронные двигатели (СД) в основном применяются в приводах средней и большой мощности, когда режим работы длительный и не требуется регулирования скорости: воздуходувки, компрессоры, вентиляторы, насосы, дробилки, мельницы, приводы черновых клетей прокатных станов и др. В горной промышленности СД применяются на мощных насосах, вентиляторах главного проветривания, компрессорах, а также в качестве компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях шахт (для повышения коэффициента мощности).

Достоинства СД: простота конструкции, надежность, высокие значения $\cos\phi$ и КПД, возможность работы с $\cos\phi = 1$ и даже с опережающим током, что позволяет осуществлять компенсацию реактивной мощности других электроприемников сети.

Схема синхронного двигателя приведена на рис. 4.10. Статор СД выполняется аналогично статору АД с трехфазной обмоткой, подключаемой к сети переменного тока. Ротор имеет обмотку возбуждения ОВ, питаемую от источника постоянного тока, и пусковую короткозамкнутую обмотку ОП в виде беличьей клетки, предназначенную для пуска СД.

Вращающий момент в СД возникает в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, и магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения (или постоянными магнитами на роторе). Взаимодействие этих полей может создавать постоянный по направлению вращающий момент только в том случае, когда ротор будет вращаться со скоростью ω_0 , т.е. синхронно с вращающимся полем статора.

Непосредственный пуск синхронного двигателя подачей напряжений на обмотки статора и возбуждения невозможен, так как ротор обладает значительным мо-

ментом инерции и не может мгновенно изменить свою частоту вращения (n) от нуля до частоты вращения магнитного поля статора (n_0). Поэтому для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно разогнать его до синхронной или близкой к ней частоты вращения, т.е. применяют *асинхронный пуск*. На роторе расположены две обмотки: короткозамкнутая (пусковая) ОП и возбуждения постоянного тока ОВ. Обмотка возбуждения двигателя при пуске замыкается на разрядный резистор R_p , который предохраняет ее от пробоя. При скорости, близкой к синхронной ($\omega \geq 0,95\omega_0$), обмотка возбуждения автоматически подключается к источнику постоянного тока на полное напряжение (контакты КМ замыкаются). При этом двигатель входит в синхронизм. Для нормального вхождения в синхронизм необходимо, чтобы входной момент был больше статического момента на валу: $M_{вх} > M_c$.

Механическая характеристика синхронного двигателя абсолютно жесткая и представляет собой прямую, параллельную оси моментов, т.е. скорость двигателя независимо от нагрузки остается постоянной и равной скорости вращения магнитного поля статора. При увеличении нагрузки на валу электродвигателя возрастает лишь угол сдвига (θ) оси полюсов ротора относительно полюсов вращающегося поля статора (или угол сдвига вектора напряжения статора относительно вектора ЭДС, индуцированной в обмотке статора полем ротора). Зависимость момента двигателя M от угла θ называется *угловой характеристикой синхронного двигателя*, которая представляет собой синусоиду: $M = M_{\max} \sin\theta$.

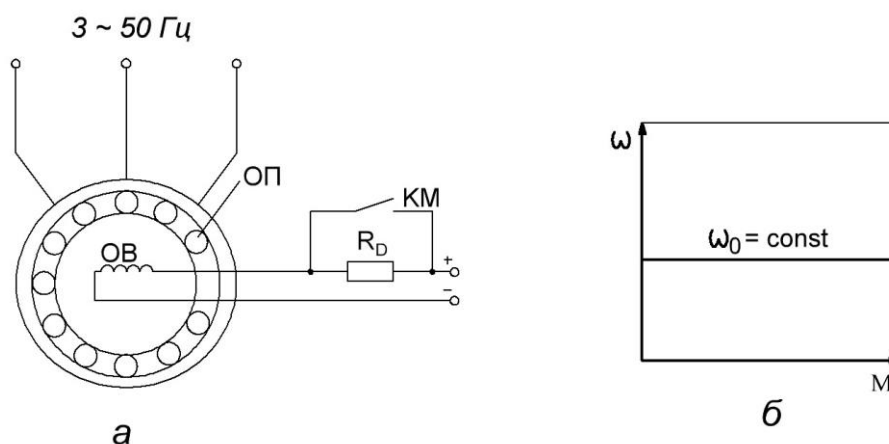


Рис. 4.10. Схема и механическая характеристика синхронного двигателя

При холостом ходе оси полюсов ротора и поля статора совпадают ($\theta = 0$ и $M = 0$). При увеличении нагрузки угол возрастает, соответственно возрастает и момент электродвигателя M . При дальнейшем увеличении нагрузки ($\theta > 90^\circ$) момент M начнет уменьшаться, что соответствует выпадению электродвигателя из *синхронизма* (т.е. нарушение синхронного вращения ротора и магнитного поля статора) и его остановке. Номинальной нагрузке на валу соответствует угол $\theta = 20 \dots 30^\circ$. Поэтому перегрузочная способность синхронного двигателя $\lambda_k = M_{\max} / M_H = 2-3$.

Максимальный момент M_{\max} пропорционален фазному напряжению сети и току в обмотке возбуждения. Поэтому перегрузочная способность синхронного двигателя может быть повышена путем увеличения тока возбуждения, что позволяет обеспечить устойчивую работу двигателя при значительных толчках нагрузки и колебаниях напряжения сети. Синхронный двигатель менее чувствителен к коле-

баниям напряжения сети, чем асинхронный, так как его момент пропорционален первой степени напряжения.

Для синхронного двигателя принципиально возможны все три способа торможения – рекуперативное, динамическое и противовключением. Практически используется только *динамическое торможение*. Рекуперативное торможение не применяется, так как нельзя получить снижения скорости без применения преобразователя частоты. В режиме противовключения электродвигатель, работая в асинхронном режиме, потребляет из сети большой ток, а так как его пусковая (асинхронная) обмотка рассчитана на кратковременную работу и длительное протекание по ней больших токов недопустимо, такое торможение нежелательно.

При динамическом торможении возбуждение синхронного двигателя сохраняется, а обмотка статора отключается от сети и замыкается на тормозной резистор. Его механические характеристики в этом режиме подобны характеристикам асинхронного двигателя при динамическом торможении.

Синхронный двигатель может работать с различным углом сдвига φ между током и напряжением статора, что является его особенностью и ценным свойством, так как угол φ можно регулировать путем изменения тока возбуждения, регулируя этим самым потребляемую из сети реактивную мощность. В процессе изменения тока возбуждения вектор тока статора двигателя может совпадать с вектором напряжения сети, отставать от него или опережать. В случае совпадения данных векторов (при некотором значении тока возбуждения угол φ равен нулю, т.е. напряжение и ток статора совпадают по фазе, а синхронный двигатель представляет собой чисто активную нагрузку) двигатель потребляет из сети только активную мощность ($\cos\varphi = 1$). Если ток возбуждения уменьшить относительно этого значения (недовозбужденный двигатель), то ток статора будет отставать от напряжения, а двигатель будет представлять собой активно-индуктивную нагрузку. При увеличении тока возбуждения (перевозбужденный двигатель) ток статора будет опережать напряжение сети по фазе, а двигатель будет представлять собой активно-емкостную нагрузку, т.е. двигатель будет отдавать в сеть реактивную мощность. Это свойство синхронного двигателя широко используют для компенсации реактивных нагрузок предприятия. В данном случае синхронный двигатель выполняет кроме основной функции также и функцию синхронного компенсатора, что дает большой экономический эффект.

4.3. Механические характеристики электродвигателей постоянного тока

Устройство машин постоянного тока. Машины постоянного тока состоят из двух основных частей: неподвижной – индуктора и вращающейся – якоря. В индуктор входят: станина 1 (рис. 4.11, а); главные полюсы, состоящие из сердечника 3 и обмотки возбуждения 4; добавочные полюсы 2. Главные полюсы предназначены для создания основного магнитного поля машины (поля возбуждения). К индуктору с двух сторон крепятся подшипниковые щиты, на одном из которых имеется щеточное устройство, состоящее из поворотной траверсы и щеткодержателей.

Якорь (рис. 4.11, б) состоит из сердечника якоря 2, набранного из листов электротехнической стали; обмотки якоря 3 и коллектора 4, который собирают из мед-

ных пластин, изолированных друг от друга и от вала. К коллекторным пластинам припаивают начала и концы секций обмотки якоря. Сердечник якоря и коллектор закреплены на валу 5. Со стороны, противоположной коллектору, на вал устанавливают вентилятор 1.

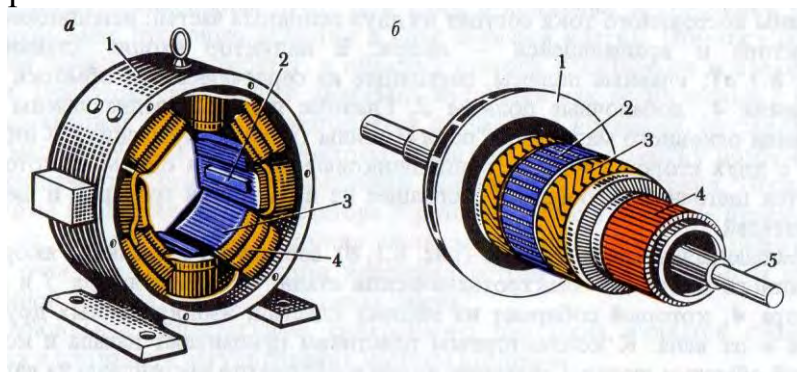


Рис. 4.11. Устройство машины постоянного тока

Механические характеристики электродвигателей постоянного тока. Электродвигатели постоянного тока могут иметь независимое, параллельное, последовательное или смешанное возбуждение (рис. 4.12).

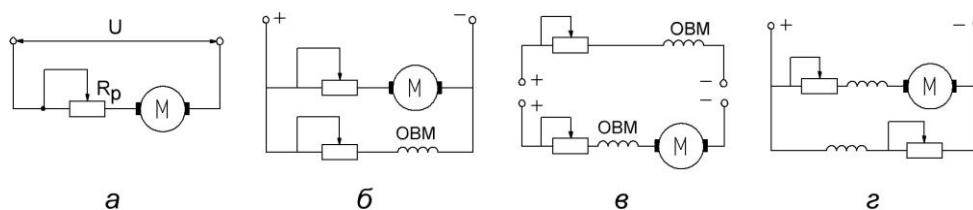


Рис. 4.12. Схемы электродвигателей постоянного тока независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения (верхняя часть схемы «в» принадлежит схеме «а»)

В электродвигателе параллельного возбуждения обмотка возбуждения присоединяется параллельно к зажимам якоря. Но ток, протекающий по этой обмотке, в отличие от тока якоря не зависит от нагрузки и определяется приложенным к якорю напряжением и общим сопротивлением цепи возбуждения. По этой причине электродвигатель параллельного возбуждения называют также электродвигателем с независимым возбуждением.

Вращающий момент M двигателя постоянного тока и его ЭДС E определяются по формулам

$$M = k \Phi I_{\text{я}}; \quad E = k\Phi\omega, \quad (4.14)$$

где k – конструктивный коэффициент двигателя;

Φ – магнитный поток, Вб;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря, А.

ω – угловая скорость, рад/с.

Уравнения электромеханической $\omega = f(I_{\text{я}})$ и механической $\omega = f(M)$ характеристик имеют вид

$$\omega = U / (k\Phi) - (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) / (k\Phi) I_{\text{я}}; \quad (4.15)$$

$$\omega = U / (k\Phi) - (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) / (k^2 \Phi^2) M.$$

Угловая скорость идеального холостого хода (при $I_{\text{я}} = 0$ или $M = 0$)

$$\omega_0 = U / (k\Phi). \quad (4.16)$$

На рис. 4.13 представлены механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) во всех режимах работы. Характерными точками характеристик в двигательном режиме являются: точка идеального холостого хода ($\omega_0, M = 0$); точка номинального режима (ω_n, M_n); точка короткого замыкания ($\omega = 0, M = M_k$).

Жесткость механической характеристики определяется потоком возбуждения и сопротивлением якорной цепи $\beta = dM/d\omega = -k^2 \Phi^2 / (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) = -M_k / \omega$.

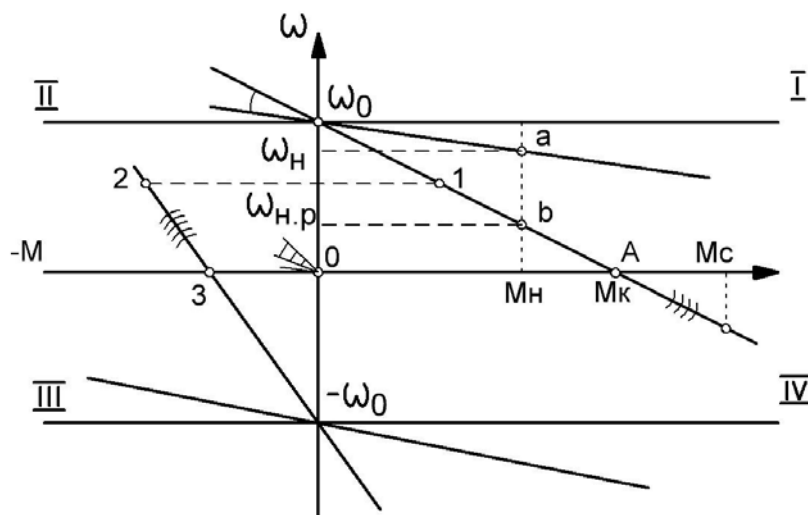


Рис. 4.13. Совмещенные механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Наибольшее значение модуля жесткости соответствует естественной механической характеристике, так как ток возбуждения равен номинальному и регулировочное сопротивление $R_{\text{р}} = 0$. По мере увеличения сопротивления реостата $R_{\text{р}}$ наклон механической характеристики возрастает, а угловая скорость снижается. При заданном значении сопротивления $R_{\text{р}}$ и номинальном моменте M_n угловая скорость двигателя $\omega_{n.p} = \omega_0 (1 - I_n (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) / U_n)$.

Для расчета механических характеристик необходимо знать сопротивление якоря двигателя $R_{\text{я}}$, которое задается в каталогах. При отсутствии заводских данных величину $R_{\text{я}}$ находят ориентировочно по формуле $R_{\text{я}} = 0,5 (1 - \eta_n) (U_n / I_n)$.

Так как механические характеристики ДПТ НВ прямолинейны, для их построения достаточно иметь две точки:

- 1) $\omega = \omega_0$ и $M = 0$,
- 2) $\omega = \omega_n$ (или $\omega = \omega_{n.p}$) и $M = M_n$.

Пуск двигателей постоянного тока. К пуску ДПТ предъявляется основное требование: не допустить при пуске протекание через якорь большого тока (больше $2,5 I_{\text{ном}}$), опасного для двигателя по условиям коммутации.

Теоретически и практически возможны три способа пуска: 1) при включении в цепь якоря пускового сопротивления только на время пуска; 2) при пониженном напряжении в цепи якоря и 3) прямой пуск (без пускового сопротивления) – только для двигателей маленькой мощности, у которых пусковой ток меньше $4 I_{\text{ном}}$ и разгон двигателя происходит меньше 1 секунды.

Пуск ДПТ при включении пускового реостата $R_{п}$ последовательно с якорем обеспечивает пусковой ток $I_{яп} = U_{я} / (R_{я} + R_{п})$ до приемлемого значения ($I_{яп}$ меньше $2,5 I_{ном}$). По мере разгона двигателя пусковой реостат выводится до нуля.

У двигателей большой мощности $R_{я} = 0,02 - 1,1$ Ом и прямой пуск для них невозможен, так как в начальный момент пуска противо-ЭДС $E_{пр} = C_e \cdot \Phi \cdot \omega = 0$ и ток якоря $I_{яп} = U_{я} / R_{я}$ может превысить номинальный ток якоря $I_{ном}$ во много раз (до 100 раз). При большом пусковом токе на коллекторе ДПТ появляется значительное искрение и возможность возникновения *кругового огня* – дугового разряда по окружности коллектора между щетками разной полярности.

Пуск ДПТ с ограниченным пусковым током возможен (без пускового реостата) и при питании якоря двигателя от отдельного источника с регулируемым выходным напряжением. Тогда ограничение пускового тока и плавный разгон двигателя обеспечиваются постепенным повышением напряжения на якоре от нуля до номинального значения. Этот метод находит применение в регулируемых мощных электроприводах постоянного тока.

Автоматизация процесса пуска облегчает управление ДПТ, устраняет возможные ошибки при пуске и ведет к повышению производительности механизмов, особенно при повторно-кратковременных режимах их работы.

Пуск двигателей постоянного тока с пусковым реостатом в цепи якоря (и асинхронных двигателей с фазным ротором) обычно осуществляют в соответствии с заданной пусковой диаграммой, при этом закорачивание ступеней пускового реостата происходит либо при достижении двигателем определенной скорости, либо при определенной силе тока, либо через заданные промежутки времени.

На рис. 4.14 изображена пусковая диаграмма двигателя с тремя ступенями пускового реостата, из которой видно, что закорачивание ступеней пускового реостата производится через время t_1 (первая ступень), через время t_2 (вторая ступень) и t_3 (третья ступень). Ток двигателя при пуске изменяется в пределах от I_1 до I_2 .

Из диаграммы рис. 4.14 также видно, что выключение (закорачивание, шунтирование) ступеней пускового реостата можно производить и при определенной угловой скорости двигателя ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$) или при определенной величине тока I_c . Очевидно, что автоматическое управление пуском ДПТ может быть осуществлено: 1) в функции скорости; 2) в функции тока; 3) в функции времени. Для примера на рис 4.15 представлен *узел управления пуском ДПТ в функции времени*.

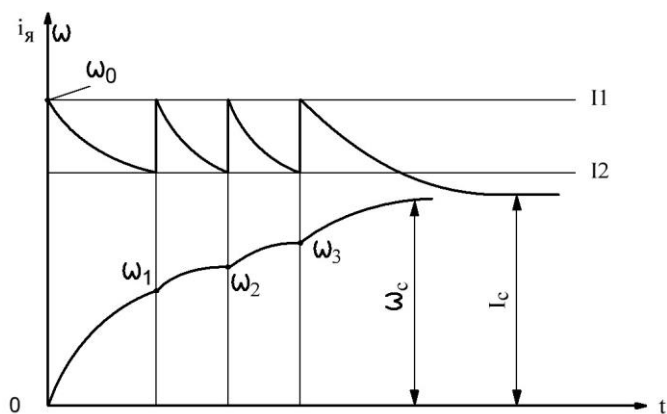


Рис. 4.14. Пусковая диаграмма ДПТ

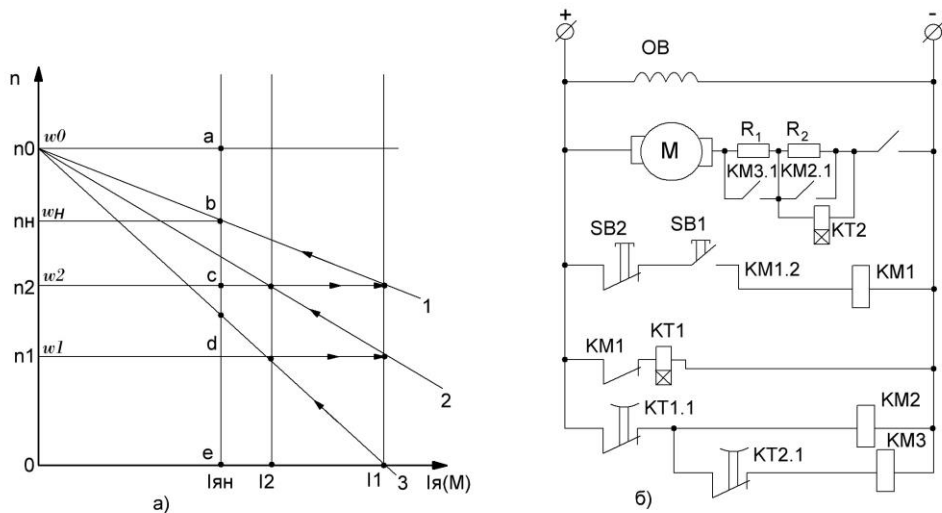


Рис. 4.15. Узел управления пуском ДПТ в функции времени

При нажатии кнопки SB1 контактор KM1 своим контактом KM1.1 подключает якорь двигателя к сети, а контактом KM1.3 отключает питание от катушки реле KT1. Падение напряжения от пускового тока на сопротивлении R1 вызывает срабатывание реле KT2, которое размыкает свой контакт. С определенной выдержкой времени замыкается контакт KT1.1 реле KT1 и контактор KM2 контактом KM2.1 шунтирует ступень R1 вместе с реле KT2. Последнее опять с выдержкой времени замыкает свой контакт KT2.1, что приводит к шунтированию ступени R2.

Управление в функции времени получило широкое применение в современных электроприводах постоянного и переменного тока благодаря своим достоинствам: простоте схемы, надежности и независимости ее работы от колебаний нагрузки или напряжения.

Реверсирование ДПТ. Для реверсирования двигателя необходимо направление вращающего момента изменить на противоположное, т.е. согласно формуле для момента $M = k \Phi I_{\text{я}}$ изменить направление или магнитного потока (направление тока в обмотке возбуждения), или тока в обмотке якоря.

Для ДПТ НВ возможны следующие *три режима электрического торможения*.

1. **Рекуперативное торможение**, которое происходит, когда скорость двигателя выше скорости идеального холостого хода. Оно является наиболее экономичным, поскольку энергия торможения передается в электрическую сеть. Механические характеристики в этом режиме являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима во II квадранте. Схема двигателя при рекуперативном торможении не изменяется.

2. **Динамическое торможение.** Якорь двигателя отключается от сети и замыкается на сопротивление. При этом механическая энергия движущихся частей (механизма и якоря двигателя) преобразуется в электрическую, которая теряется в виде тепловой энергии в сопротивлениях якорной цепи. Механические характеристики в данном режиме торможения проходят через начало координат (на рис. 4.13 – линии с тремя засечками).

3. **Торможение противовключением** осуществляется двумя способами:

1) *введением большого сопротивления в цепь якоря.* При этом вращающий момент двигателя становится меньше, чем статический момент нагрузки M_c . Двигатель останавливается (в точке А), а затем под действием момента M_c начинает

вращаться в другом направлении, развивая тормозной момент; в точке Б наступит установившийся режим. Механические характеристики являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима (на рис. 4.13 – линии с четырьмя засечками);

2) *торможение переключением полярности обмотки якоря по ходу*. Двигатель, работающий в точке 1, после переключения перейдет на реостатную характеристику в точку 2. По линии 2–3 происходит торможение (линия с пятью засечками). В точке 3 двигатель останавливается и его следует отключить от сети, чтобы избежать перехода в двигательный режим с вращением в обратном направлении.

В двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением ток якоря одновременно является и током возбуждения. Магнитный поток возбуждения растет с увеличением нагрузки, вследствие чего угловая скорость снижается согласно уравнению (4.2) и механическая характеристика двигателя будет мягкой (рис. 4.16). Благодаря этому ДПТ НВ сравнительно легко и плавно преодолевает перегрузки и имеет высокий пусковой момент. Данные свойства двигателя позволяют широко применять его в приводе транспортных механизмов. Механические характеристики двигателя значительно смягчаются при введении в цепь якоря реостата (рис. 4.16, линии с одной засечкой).

У ДПТ ПВ нельзя осуществить режим рекуперативного торможения, поскольку в нем отсутствует скорость идеального холостого хода.

Динамическое торможение может осуществляться по схеме с самовозбуждением и с независимым возбуждением. В первом случае якорь и обмотка возбуждения отключаются от сети и замыкаются на реостат. Чтобы избежать размагничивания машины, необходимо переключить обмотку возбуждения (или якорь) таким образом, чтобы направление тока в обмотке возбуждения не изменилось. В этом случае машина самовозбуждается при данном сопротивлении цепи якоря лишь при определенном значении угловой скорости; возбуждись, она создает тормозной момент. Механические характеристики нелинейны (на рис. 4.16 – кривые с четырьмя засечками).

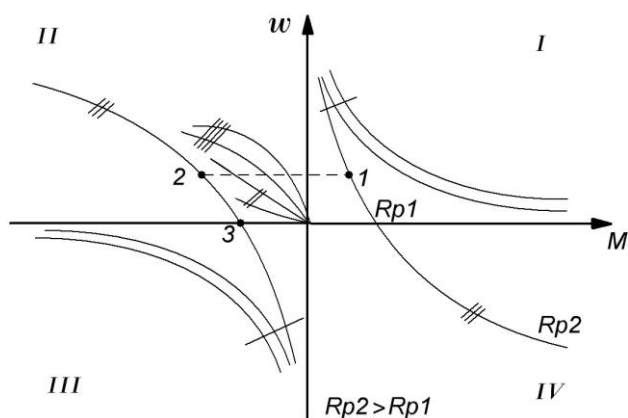


Рис. 4.16. Механические характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Механические характеристики двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбуждением аналогичны соответствующим характеристикам двигателя с независимым возбуждением (на рис. 4.16 – линии с двумя засечками).

Такой способ торможения нашел широкое применение, а первый способ используют редко, в основном как аварийный, например, при исчезновении напряжения сети.

Торможение противовключением осуществляется, как у ДПТ НВ, двумя способами:

- 1) включением в цепь якоря большого сопротивления;
- 2) изменением полярности обмотки якоря, оставив направление тока в обмотке возбуждения без изменения.

При первом способе механическая характеристика будет продолжением характеристики, соответствующей двигательному режиму (на рис. 4.16 – линия с тремя засечками). При втором способе торможение осуществляется по линии 1–2–3.

Регулирование скорости электроприводов постоянного тока. Скорость ДПТ НВ можно регулировать:

- 1) путем изменения сопротивления в цепи якоря;
- 2) изменением потока возбуждения;
- 3) изменением напряжения, подводимого к якорю.

Регулирование *по первому способу* имеет существенно недостатки:

- уменьшается жесткость механических характеристик при снижении угловой скорости, а потери мощности в главной цепи возрастают;
- диапазон регулирования ограничен, особенно при малых нагрузках;
- невелики плавность и точность регулирования.

По этим причинам такой способ регулирования в приводе постоянного тока используется редко.

По *второму способу* можно регулировать магнитный поток только в сторону уменьшения (так как в номинальном режиме магнитная цепь двигателя насыщена), что соответствует увеличению скорости выше номинальной. Возможный диапазон регулирования скорости при этом не превышает 2 для двигателя нормального исполнения. Верхний предел скорости ограничивается механической прочностью элементов якоря двигателя – бандажей обмотки якоря, коллектора.

Основным способом регулирования скорости ДПТ НВ является способ, основанный на изменении подводимого к якорю напряжения, которое осуществляется с помощью специального регулируемого преобразователя. В качестве индивидуальных источников питания используют в основном тиристорные преобразователи. Жесткость механических характеристик привода по системе «преобразователь – ДПТ НВ» практически постоянна. Механические характеристики представляют собой семейство параллельных друг другу прямых. Диапазон, плавность, точность регулирования здесь выше, чем при других способах регулирования. Поэтому данная система привода применяется для механизмов, требующих глубокого и плавного регулирования скорости.

Расчет добавочных резисторов в цепи якоря ДПТ НВ. Если известна естественная электромеханическая или механическая характеристика 1 двигателя (рис. 4.17) и его паспортные данные, то расчет сопротивления R_d , при включении которого в цепь якоря желаемая искусственная характеристика 2 пройдет через точку А с заданными координатами $\omega_{и}$, $I_{и}$ или $\omega_{и}$, $M_{и}$, можно выполнить следующими наиболее распространенными методами.

Метод пропорций. Запишем отношение перепадов скорости при токе $I_{и}$ или моменте $M_{и}$ на естественной $\Delta\omega_e$ и желаемой искусственной $\Delta\omega_{и}$ характеристиках:

$$\Delta\omega_e / \Delta\omega_n = I_n R_{\text{я}} / (I_n (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})) = R_{\text{я}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{д}}).$$

Тогда искомая величина $R_{\text{д}} = R_{\text{я}} (\Delta\omega_n / \Delta\omega_e - 1)$.

Метод отрезков не требует знания значения собственного сопротивления двигателя $R_{\text{я}}$ (более того, его значение можно определить по известной естественной характеристике).

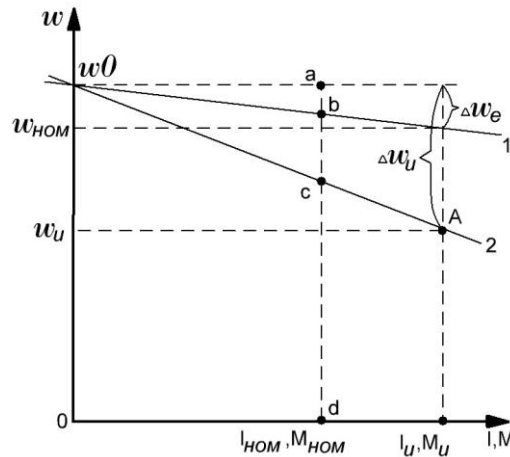


Рис. 4.17. Характеристики ДПТ НВ для расчета величины регулировочных резисторов

Запишем выражение для скорости двигателя на заданной искусственной характеристике (см. рис. 4.17) при номинальных токе I_n , моменте M_n , магнитном потоке Φ_n и напряжении U_n :

$$\omega_n = U_n / (k\Phi_n) (1 - I_n R / U_n),$$

где $U_n / (k\Phi_n) = \omega_0$.

Тогда

$$\omega_n = \omega_0 (1 - R / R_n). \quad (4.17)$$

Здесь $R_n = U_n / I_n$ – так называемое номинальное сопротивление, являющееся базовой величиной при расчетах, Ом.

Соотношение $R / U_n = (\omega_0 - \omega_n) / \omega_0 = \delta$ отражает важное свойство ДПТ НВ: относительный перепад скорости $\delta = \Delta\omega / \omega_0$ равен относительному активному сопротивлению цепи якоря R / R_n .

Обозначим на рис. 4.17 характерные точки a, b, c, d и отметим, что $\omega_0 - \omega_n = \Delta\omega = ac$, $\omega_0 = ad$. Тогда $R = R_n \Delta\omega / \omega_0 = R_n ac / ad$; $R_{\text{д}} = R_n bc / ad$; $R_{\text{я}} = R_n ab / ad$.

Таким образом, для нахождения $R_{\text{д}}$ необходимо сначала по характеристикам определить длины отрезков bc и ad при номинальном токе или моменте и рассчитать номинальное сопротивление $R_n = U_n / I_n$.

Расчет добавочных резисторов можно выполнить также по следующим формулам для заданного допустимого тока $I_{\text{доп}}$, который определяется величиной допустимого момента $M_{\text{доп}}$ или условиями пуска, реверса и торможения.

Сопротивление резистора $R_{\text{д1}}$ при пуске ($E = 0$)

$$R_{\text{д1}} = (U / I_{\text{доп}}) - R_{\text{я}}. \quad (4.18)$$

Сопротивление резистора $R_{\text{д2}}$ при динамическом торможении

$$R_{\text{д2}} = (E / I_{\text{доп}}) - R_{\text{я}} \approx (U / I_{\text{доп}}) - R_{\text{я}}. \quad (4.19)$$

Сопротивление резистора $R_{\text{д3}}$ при реверсе или торможении противовключением

$$R_{\text{д3}} = ((U + E) / I_{\text{доп}}) - R_{\text{я}} \approx (2U / I_{\text{доп}}) - R_{\text{я}}. \quad (4.20)$$

Тема 5. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

5.1. Критерии выбора электродвигателей. Основные режимы работы электродвигателей по нагреву

Наиболее трудоемким и ответственным этапом проектирования электропривода для производственного механизма является выбор электродвигателя. Задача выбора состоит в поиске такого двигателя, который обеспечит по мощности заданный технологический цикл рабочей машины, будет соответствовать условиям окружающей среды, компоновке с рабочей машиной и при этом иметь нормативный (допустимый) нагрев. В общем случае электропривод должен удовлетворять ряду требований, даже противоречивых (поэтому при выборе электродвигателя в конкретном случае приходится руководствоваться технико-экономическими соображениями).

Для электропривода производственного механизма следует выбирать наиболее простой двигатель по устройству и управлению, экономичный и надежный в эксплуатации, имеющий наименьший вес, габариты и стоимость. Вместе с тем двигатель должен полностью удовлетворять требованиям технологического процесса и соответствовать условиям окружающей среды, в которой он будет находиться во время эксплуатации.

Для правильного выбора электродвигателя для конкретного производственного механизма следует руководствоваться критериями выбора по следующим показателям: мощности, скорости, напряжению, роду тока, условиям эксплуатации, конструктивному исполнению монтажа.

Мощность электродвигателя должна соответствовать нагрузке на его валу, так как *недостаточная* мощность может привести к нарушению нормальной работы механизма, снижению его производительности, перегреву электродвигателя (из-за возможных перегрузок) и сокращению его срока службы и даже к возникновению аварийной ситуации, а *излишняя мощность* увеличивает капитальные затраты и эксплуатационные расходы вследствие недогрузки электродвигателя и снижения его КПД (у АД коэффициента мощности). Поэтому определение номинальной мощности электродвигателя выполняют в соответствии с нагрузочными диаграммами механизмов и режимами их работы.

Скорость электродвигателя выбирается такой, чтобы обеспечить необходимый технологический процесс производственного механизма. При заданном передаточном числе редуктора или другой передачи этот вопрос решается однозначно, т.е. по известному передаточному отношению и заданной скорости производственного механизма. Выбор номинальной скорости электродвигателя и передаточного числа редуктора вновь проектируемого электропривода должен производиться путем технико-экономического сравнения нескольких вариантов, исходя из определенного критерия оптимальности: быстродействия, минимума стоимости редуктора, двигателя и др.

Выбор электродвигателя по напряжению для механизмов действующего предприятия производится по напряжениям существующих на предприятии сетей переменного и постоянного тока. Выбор напряжения для питания электродвигателей вновь сооружаемого предприятия решается совместно с выбором напряжений для всего предприятия в целом путем технико-экономического сравнения нескольких вариантов электроснабжения.

АД малой и средней мощности выпускаются с номинальными напряжениями 220/127, 380/220 и 660 В. АД и СД средней и большой мощности выпускаются на напряжения 3, 6 и 10 кВ. Наиболее распространенными номинальными напряжениями двигателей постоянного тока (ДПТ) являются 110, 220 и 440 В. При значительной мощности ДПТ номинальные напряжения лежат в пределах 660...900 В.

По роду тока для производственных механизмов могут применяться ДПТ с различным возбуждением (параллельного, независимого, последовательного, смешанного) и переменного тока: АД с короткозамкнутым или фазным ротором и СД.

Наиболее простыми по устройству и управлению, надежными и экономичными в эксплуатации, имеющими наименьший вес, габариты и стоимость при определенной мощности, являются АД с короткозамкнутым ротором. Их вес на единицу мощности в 1,5...2,0 раза ниже, чем у ДПТ.

АД по сравнению с ДПТ имеют еще одно преимущество: питание их осуществляется непосредственно от сети трехфазного тока, т.е. для них не требуются сложные и дорогие преобразовательные устройства переменного тока в постоянный.

Чаще всего АД применяются при невысокой частоте включений, когда не требуется регулирование скорости или возможно ее ступенчатое регулирование. В настоящее время перспективными являются и установки с глубоким регулированием скорости АД при частотном управлении.

В установках, где требуется регулирование в относительно небольших пределах, плавный пуск, хорошие тормозные качества, ограничение токов в переходных режимах, применяются АД с фазным ротором. Характерной особенностью этих двигателей является уменьшение с помощью реостатов их пусковых токов при одновременном увеличении пускового момента. АД с фазным ротором широко применяется для привода механизмов с частыми пусками и торможениями.

Для механизмов средней и большой мощности, где не требуется регулирование скорости, перспективным является использование СД, которым присущи такие положительные качества, как жесткость механической характеристики, высокая перегрузочная способность, меньшая по сравнению с АД зависимость критического момента от напряжения сети, высокие энергетические показатели, возможность компенсации реактивной энергии.

Для механизмов с высокими требованиями в отношении регулирования скорости, качества работы в динамических режимах, с частыми пусками и остановами применяются электродвигатели постоянного тока, при этом в зависимости от характера статического момента на валу и диапазона регулирования используются ДПТ независимого (параллельного), последовательного или смешанного возбуждения. Их использование в этих случаях связано с необходимостью применения преобразователей переменного тока в постоянный.

В регулируемых электроприводах применяют системы, которые при выполнении технологических требований оказываются более выгодными экономически. Поэтому чаще всего экономическое сравнение регулируемых электроприводов ведут в такой последовательности: полюсно-переключаемые АД, АД с фазным ротором и реостатным регулированием скорости, система «управляемый преобразователь напряжения – ДПТ», система «преобразователь частоты – АД».

При выборе электродвигателя необходимо учитывать *условия эксплуатации*, под которыми понимают воздействие климатических факторов и состояние окружающей среды. Электродвигатели изготавливаются для работы в умеренном климате, умеренном и холодном, тропическом, морском. Климатические условия характеризуются максимальной, минимальной и средней температурами. Например, эти температуры составляют + 40, -45 и +10 °С – для умеренного климата, +45, -10 и +27 °С – для тропического, +40, -40 и +10 °С – для морского климата.

По способу защиты электродвигателя от воздействия окружающей среды различают:

– *защищенные электродвигатели*, у которых все вращающиеся и токоведущие части предохранены от случайного прикосновения человека и попадания внутрь посторонних предметов и капель воды, падающих отвесно или под углом не более 60° к вертикали (у этих двигателей имеются защитные приспособления в виде коробов, решеток, сеток);

– *закрытые электродвигатели*, которые бывают обдуваемые, продуваемые и герметические. У *обдуваемых* электродвигателей (с самовентиляцией) на валу укреплен вентилятор, который засасывает воздух и прогоняет его через ребристый корпус. У *продуваемых* электродвигателей (с независимой вентиляцией) воздух для охлаждения подводится через трубы отдельным от двигателя вентилятором. Герметические (взрывозащитные) электродвигатели предназначены для работы во взрывоопасных помещениях.

По способу вентиляции двигатели выполняются с естественной, с самовентиляцией и независимой вентиляцией. При *естественной* вентиляции двигатели не имеют каких-либо специальных устройств для охлаждения. У двигателей с *самовентиляцией* охлаждение осуществляется вентилятором, смонтированным на валу двигателя. При *закрытом исполнении* вентилятор устанавливается снаружи под колпаком. Он обдувает ребристую поверхность двигателя (такие двигатели называются *обдуваемыми*).

Интенсивность охлаждения электродвигателей с естественной вентиляцией и самовентиляцией зависит от угловой скорости вала двигателя и ухудшается при ее снижении. Охлаждение двигателей при независимой вентиляции осуществляется с помощью специального вентилятора, приводимого в движение дополнительным двигателем, что позволяет несколько повысить нагрузку главного двигателя, особенно при снижении его скорости.

Закрытые электродвигатели более сложны по конструкции защитных устройств. Они не имеют специальных отверстий для обмена воздухом между двигателем и окружающей средой. Взрывозащищенные двигатели снабжаются специальным кожухом, который без повреждений может противостоять взрыву внутри двигателя и препятствует распространению пламени в окружающую среду. *Водозащищенные двигатели* выполняются с усиленными уплотнениями крышек при помощи резиновых прокладок, а выступающий конец вала проходит через специальный сальник. У *герметичных двигателей* все отверстия и соединения закрыты и уплотнены так тщательно, что исключается всякое сообщение между внутренним пространством машины и внешней газовой средой или жидкостью. Герметичные двигатели могут работать погруженными в воду.

Выбор электродвигателя по способу защиты от действия окружающей среды должен производиться в зависимости от условий, в которых он будет работать.

Большое значение имеет правильный выбор электродвигателя по **конструктивному исполнению в отношении монтажа**. Для большинства производственных механизмов применяют электродвигатели с горизонтальным расположением вала и лапами для крепления к несущим конструкциям. Для некоторых механизмов целесообразным является применение двигателей с вертикальным расположением вала и креплением на лапах. Выпускаются электродвигатели с вертикальным или горизонтальным расположением вала и фланцевым креплением. В наибольшей степени в конструктивные формы механизмов вписываются встраиваемые электродвигатели, которые не имеют станины, подшипниковых щитов, а иногда и вала. Монтируются они в корпусах производственных механизмов и иногда непосредственно выполняют функции рабочих органов.

Для обозначения конструктивного исполнения по способу монтажа применяют латинские буквы IM (от англ. International Mounting) и следующие за ними четыре цифры. Первая цифра показывает группу конструктивного исполнения (на лапах, без лап, с фланцем и т.д.), вторая и третья – способы монтажа, а четвертая – исполнение конца вала (цилиндрический, конический и др.). Например: IM1001 – электродвигатель с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, вал горизонтальный; IM1011 – то же, но с вертикальным валом.

Нагрев и охлаждение электродвигателей. Процесс преобразования электрической энергии в механическую в электродвигателе сопровождается потерями мощности ΔP , которые превращаются в тепло. В результате отдельные части электродвигателя нагреваются. Особенно чувствительна к повышению температуры изоляция обмоток, срок службы которой в значительной мере определяет срок службы электродвигателя. Поэтому наибольшая допустимая температура $t_{\text{доп}}$ электродвигателя определяется применяемыми изоляционными материалами для изготовления его обмоток.

Изоляционные материалы по нагревостойкости делятся на 7 классов (Y, A, E, B, F, H, C), из которых наиболее распространенными для электроприводов являются:

класс A – хлопчатобумажные ткани и шелк, пропитанные в жидком диэлектрике, $t_{\text{доп}} = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$;

класс E – синтетические органические пленки (эмали), $t_{\text{доп}} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$;

класс B – слюда, асбест, стекловолокно, $t_{\text{доп}} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$;

класс F – слюда, асбест, стекловолокно с синтетическими связывающими веществами и с пропитыванием диэлектрическими составами, $t_{\text{доп}} = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Срок службы изоляции при указанных предельных температурах примерно 15–20 лет.

Номинальная мощность электродвигателя относится к температуре окружающей среды $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При меньшей температуре, чем $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, допустимая длительная нагрузка электродвигателя может быть больше номинальной, а при температуре окружающей среды более $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ допустимая длительная нагрузка должна быть меньше номинальной.

Для электродвигателей нормируется не допустимая температура обмоток, а допустимое превышение их температуры над температурой окружающей среды, называемое **перегревом τ** .

При постоянной нагрузке нагрев электродвигателя описывается уравнением

$$\tau = t^0 - t_{\text{окр ср}}^0 = \tau_y (1 - e^{-t/T_H}) + \tau_0 e^{-t/T_H}, \quad (5.1)$$

где $\tau_y = Q/A$ – установившийся перегрев, °С;

Q – количество тепла, выделяемое электродвигателем в единицу времени, Дж / с;

A – количество тепла, отдаваемое электродвигателем в окружающую среду в единицу времени при разности температур в 1 °С (теплоотдача), Дж / (с · °С);

τ_0 – начальный перегрев (в момент времени $t = 0$);

$T_H = C/A$ – постоянная времени нагрева, т.е. скорость нарастания температуры электродвигателя;

C – теплоемкость электродвигателя, т.е. количество тепла, необходимое для повышения температуры двигателя на 1 °С, Дж / °С.

Зависимость $\tau = f(t)$ представлена на рис. 5.1 кривой 1. Величина τ_y является асимптотой этой кривой. Нагрев двигателя происходит по экспоненциальному закону и характеризуется *постоянной времени нагрева* T_H . Время достижения перегревом своего установившегося значения τ_y при экспоненциальном законе его изменения теоретически бесконечно большое. Практически процесс нагревания считается законченным, когда перегрев τ достигает (0,95...0,98) τ_y за время $t_{\text{уст}} = (3...4) T_H$. Например, при $t = 4 T_H$ $\tau = 0,982 \tau_y$, т.е. разница между τ и τ_y меньше двух процентов.

Таким образом, время достижения перегревом своего установившегося значения зависит от постоянной времени нагрева двигателя. Так как теплоемкость двигателя пропорциональна его объему, а теплоотдача – площади его поверхности, то двигатели большей мощности, имеющие большие габариты, характеризуются и большей постоянной времени нагрева. У защищенных электродвигателей малой мощности T_H составляет 20...30 мин, а у закрытых двигателей большой мощности 2–3 ч.

При отключении от сети нагретого электродвигателя он начнет охлаждаться. Уравнение его охлаждения имеет вид (см. рис. 5.1):

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T_0}. \quad (5.2)$$

Остывание неподвижного электродвигателя происходит медленнее (его *постоянная времени охлаждения* $T_0 > T_H$), чем нагревание, что объясняется отсутствием его вентиляции при $\omega = 0$.

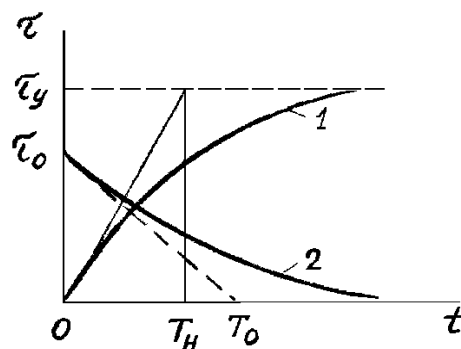


Рис. 5.1. Кривые нагрева (1) и охлаждения (2) двигателя

Из приведенных уравнений следует, что процессы нагревания и охлаждения электродвигателя зависят практически от величин τ_y , T_H и T_0 . Величина τ_y прямо

пропорциональна количеству тепла, выделяемого в электродвигателе и определяемого в основном потерями в обмотках, и обратно пропорциональна коэффициенту теплоотдачи, который в значительной степени зависит от вентиляции двигателя: чем лучше вентиляция, тем меньше τ_y . Установившийся тепловой режим наступает тогда, когда все выделяемое в двигателе тепло отдается в окружающую среду, т.е. когда температура двигателя становится неизменной ($\tau = \tau_y = \text{const}$).

Основные режимы работы электродвигателей по нагреву. Величина нагрузки электродвигателя в процессе его работы может изменяться различным образом, при этом он может периодически или эпизодически отключаться от сети на некоторое время. Поэтому нагрев электродвигателя при его работе не является постоянным. Стандарт устанавливает восемь номинальных режимов работы электропривода с условными обозначениями от S1 до S8. Из них основными являются режимы S1...S3, а остальные (S4...S8) – это модификации основных режимов. Рассмотрим основные режимы:

S1 – **продолжительный** (или **длительный**) – перегрев электродвигателя достигает установившегося значения τ_y (рис. 5.2, а). Длительность рабочего периода $t_p > 3T_n$, длительность паузы роли не играет. В продолжительном режиме работают двигатели насосов, компрессоров, конвейеров, прокатных станков и т.п. Различают продолжительный режим с постоянной и с переменной нагрузкой;

S2 – **кратковременный** – периоды постоянной нагрузки чередуются с отключениями, при этом τ не достигает τ_y ($t_p \leq 3T_n$), а во время отключения электродвигатель охлаждается до температуры окружающей среды ($t_0 > 3T_0$), рис. 5.2, б. Для кратковременного режима рекомендуется продолжительность рабочего периода 15, 30, 60, 90 мин. В таком режиме работают электродвигатели подъемников, приводов заслонок, задвижек и т.п.;

S3 – **повторно-кратковременный** – периоды с постоянной нагрузкой (рабочие периоды) чередуются периодически с отключениями электродвигателя (паузами), при этом перегрев τ за время одного рабочего цикла $t_{ц}$ не достигает τ_y (рис. 5.2, в). При повторно-кратковременном режиме время цикла не более 10 мин (в противном случае двигатель считается работающим в продолжительном режиме по нагреву).

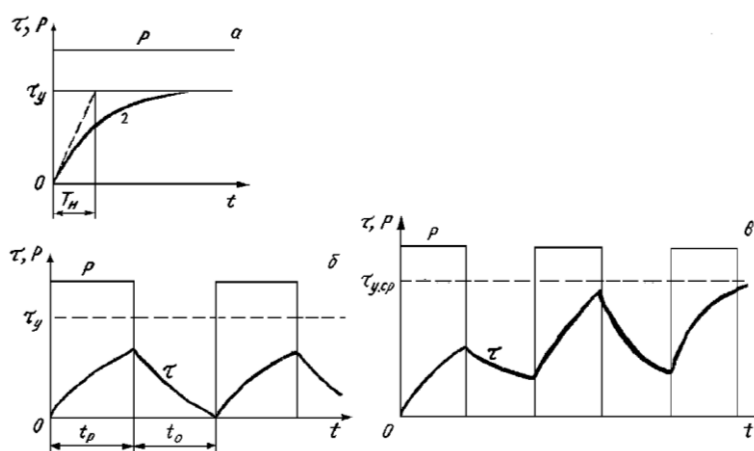


Рис. 5.2. Графики номинальных режимов электроприводов

Повторно-кратковременный режим характеризуется относительной продолжительностью включения ПВ в процентах:

$$\text{ПВ} = t_p / (t_p + t_0) 100 \% = (t_p / t_{\text{ц}}) 100 \%. \quad (5.3)$$

Стандартные значения ПВ = 15, 25, 40 и 60 %.

Повторно-кратковременный режим характеризуется условиями $t_p < 3T_{\text{н}}$, т.е. за время одного рабочего периода перегрев не достигает τ_y , а за время паузы не становится равным нулю. При многократном повторении циклов процесс нагрева устанавливается (температура перегрева в начале и в конце цикла одинакова, τ колеблется около среднего значения $\tau_{y,\text{cp}}$). В повторно-кратковременном режиме работают электроприводы кранов, некоторых вспомогательных механизмов прокатных станов и т.п.

5.2. Построение нагрузочных диаграмм механизма и электропривода. Методы расчета мощности электродвигателей

Принято различать *нагрузочные диаграммы механизма и электропривода*. **Под нагрузочной диаграммой механизма понимают зависимость момента сопротивления механизма M_m или мощности P_m от времени.** Вместе с нагрузочной диаграммой механизма дается или рассчитывается *скоростная диаграмма $\omega_m(t)$* .

Для электропривода нагрузочная диаграмма ($M = f(t)$ или $P = f(t)$) более сложна, так как она определяется не только статическими режимами работы, но и переходными процессами электропривода. Переходные процессы в системе электропривода оказывают заметное влияние на момент, развиваемый двигателем, и соответственно на зависимость $M(t)$. К ним прежде всего относятся: включение двигателя в сеть и его отключение, изменение параметров подводимого напряжения, главных цепей и цепей возбуждения и т.п. В таких случаях $d\omega/dt \neq 0$. Поэтому при построении нагрузочной диаграммы электропривода $M(t)$ следует пользоваться уравнением движения.

Для электроприводов, работающих длительно с постоянной нагрузкой и скоростью, можно не учитывать потери энергии в переходных процессах, т.е. не учитывать динамическую составляющую момента двигателя и считать $M(t) = M_c = \text{const}$ и $P(t) = P_c = \text{const}$.

Формулы для расчета мощности и момента производственных механизмов определяются спецификой их работы и относительно просты. Например, мощность насоса зависит от массы перекачиваемой жидкости и скорости ее движения, мощность подъемного механизма определяется весом поднимаемого груза и скоростью подъема, мощность двигателя шпинделя металлорежущего станка – усилием резания и скоростью резания и т.д.

Более сложным представляется построение нагрузочной диаграммы электропривода, когда скорость, ускорение и другие показатели системы не остаются постоянными в процессе работы механизма. В качестве примера рассмотрим построение нагрузочной диаграммы лифта для рабочего участка, на котором кабина лифта разгоняется до определенной линейной скорости v , движется некоторое время с постоянной скоростью $v = \text{const}$, а затем затормаживается.

Режим работы электропривода лифтов (как пассажирских, так и грузовых) характеризуется частыми включениями и отключениями: 100 – 240 включений в час для пассажирских лифтов и 70 – 100 включений в час для грузовых лифтов.

В зависимости от назначения применяются пассажирские лифты со следующими номинальными скоростями:

- в административных зданиях и гостиницах: до 9 этажей – от 0,7 м/с до 1 м/с; от 9 до 16 этажей – от 1 до 1,4 м/с;
- в административных зданиях от 16 этажей – 2 и 4 м/с.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к электроприводу лифтов, является необходимость ограничения ускорений и замедлений кабины $a=dv/dt$ и их производных (рывков) $\rho=d^2v/dt^2$.

Максимальная величина ускорения (замедления) движения кабины при нормальных режимах работы не должна превышать: для всех лифтов, кроме больничных, 2 м/с^2 , для больничных лифтов – 1 м/с^2 .

Рывок правилами не регламентируется. Однако необходимость его ограничения, как и ограничение ускорения, определяется необходимостью ограничения динамических нагрузок в механической передаче во время переходных процессов и задачей обеспечения требуемого комфорта для пассажиров. Ограничение величин ускорения и рывка должно обеспечивать высокую плавность переходных процессов и тем самым исключить отрицательное влияние на самочувствие пассажиров. Для скоростных лифтов максимальное значение рывка составляет $3 - 10 \text{ м/с}^3$.

Для обеспечения максимальной производительности лифта во время переходных процессов электропривод должен обеспечивать разгон и замедление кабины с максимальными допустимыми значениями ускорения и рывка. Соответствующий выполнению этого условия график движения кабины, который обычно считается оптимальным (так как он обеспечивает минимальную длительность режимов разгона - торможения кабины), приведен на рис. 5.3. В соответствии с этим графиком, значения рывка ρ и ускорения a на определенных интервалах переходного процесса поддерживаются постоянными и равными предельно допустимым значениям.

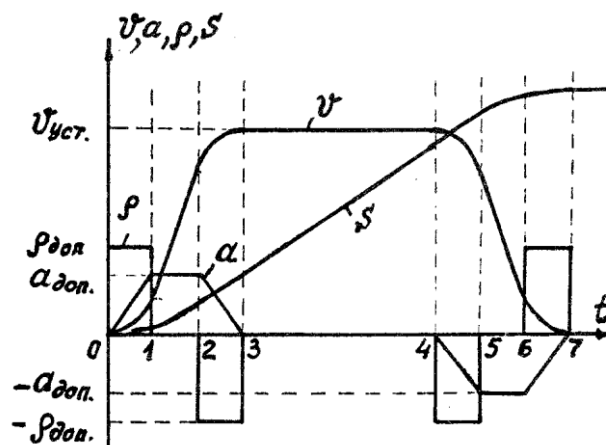


Рис. 5.3. Оптимальная диаграмма движения кабины лифта

На первом этапе разгона $0 - 1$ поддерживается постоянным рывок, при этом ускорение изменяется по линейному закону

$$a_1(t) = \int_0^t \rho_{\text{доп}} dt = \rho_{\text{доп}} t, \quad (5.4)$$

а изменение скорости характеризуется квадратичной параболой:

$$v_1(t) = \int_0^t a_1(t) dt = \int_0^t \rho_{\text{доп}} t dt = \rho_{\text{доп}} t^2/2. \quad (5.5)$$

Путь s , проходимый кабиной на этом этапе, определяется кубической параболой:

$$s_1(t) = \int_0^t v_1(t) dt = \int_0^t \rho_{\text{доп}} t^2/2 dt = \rho_{\text{доп}} t^3/6. \quad (5.6)$$

Длительность первого интервала движения определяется из условия: $t_1 = a_{\text{доп}}/\rho_{\text{доп}}$.

В конце первого интервала движения ускорение достигает допустимого значения $a_1 = a_{\text{доп}}$, а скорость и пройденный путь могут быть определены при условии $t = t_1$ подстановкой в (5.1) и (5.2):

$$v_1 = a_{\text{доп}}^2/(2\rho_{\text{доп}}); \quad s_1 = a_{\text{доп}}^3/(6\rho_{\text{доп}}^2).$$

На третьем этапе движения 2 – 3, которым завершается режим разгона электропривода до установившейся скорости $v_{\text{уст}}$, рывок имеет ту же величину, что и на первом этапе, но с противоположным знаком: $\rho = -\rho_{\text{доп}} = \text{const}$, а изменения ускорения и скорости характеризуются зависимостями:

$$\Delta a_3(t) = a_{\text{доп}} + \int_0^t (-\rho_{\text{доп}}) dt = a_{\text{доп}} - \rho_{\text{доп}} t;$$

$$\Delta v_3(t) = \int_0^t a_3(t) dt = \int_0^t (a_{\text{доп}} - \rho_{\text{доп}} t) dt = (a_{\text{доп}} - \rho_{\text{доп}} t/2).$$

Длительность третьего этапа движения равна длительности первого этапа:

$$\Delta t_3 = t_1 = a_{\text{доп}}/\rho_{\text{доп}}.$$

В конце третьего этапа ускорение $a_3=0$, а изменение скорости на этом этапе

$$\Delta v_3 = a_{\text{доп}}^2/(2\rho_{\text{доп}}).$$

На втором этапе разгона 1 – 2 скорость изменяется на величину:

$$\Delta v_2 = v_{\text{уст}} - v_1 - \Delta v_3 = v_{\text{уст}} - a_{\text{доп}}^2/(2\rho_{\text{доп}}) - a_{\text{доп}}^2/(2\rho_{\text{доп}}) = v_{\text{уст}} - a_{\text{доп}}^2/\rho_{\text{доп}}.$$

Изменение этой скорости во времени на втором этапе характеризуется линейной зависимостью:

$$\Delta v_2(t) = \int_0^t a_{\text{доп}} dt = a_{\text{доп}} t.$$

Длительность второго этапа $\Delta t_2 = t_1 = v_{\text{уст}}/a_{\text{доп}} - a_{\text{доп}}/\rho_{\text{доп}}$.

Полная длительность разгона представляет собой сумму длительностей первых трех этапов:

$$t_{\text{раз}} = t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = v_{\text{уст}}/a_{\text{доп}} + a_{\text{доп}}/\rho_{\text{доп}}.$$

Это выражение характеризует минимальное время разгона при наличии ограничений на ускорение и рывок. Так, например, если $v_{\text{уст}} = 4$ м/с, $a_{\text{доп}} = 2$ м/с², $\rho_{\text{доп}} = 5$ м/с³, то минимальное время разгона будет: $t_{\text{раз}} = 4/2 + 2/5 = 2,4$ с.

Аналогично могут быть получены выражения, характеризующие движение кабины в процессе торможения на 5-ом, 6 и 7-ом этапах диаграммы рис. 5.3. Например, для 5-го этапа (4 – 5):

$$\rho_5 = -\rho_{\text{доп}}; \quad a_5(t) = -\rho_{\text{доп}} t; \quad \Delta v_5(t) = -\rho_{\text{доп}} t^2/2; \quad \Delta t_5 = a_{\text{доп}}/\rho_{\text{доп}};$$

$$\Delta v_5 = -a_{\text{доп}}^2/(2\rho_{\text{доп}}).$$

Приведенные выше формулы позволяют строить оптимальный график движения кабины лифта и определять скорости, пути и длительности всех этапов движения при заданных значениях установившейся скорости и допустимых величинах ускорения и рывка.

По соответствующим формулам можно рассчитать статическую нагрузку лифта $M_c(t)$.

Заданными для кабины лифта являются угловая скорость движения кабины ω (или линейная скорость v), а также максимальные значения величин $d\omega/dt$ и $d^2\omega/dt^2$, которые можно представить в виде графиков (рис. 5.4), состоящих из семи участков. Первым строится участок 4 графиков, на котором $\omega = \text{const}$. Затем можно построить участки 2 и 6, на которых постоянными являются ускорение и замедление, а скорость увеличивается и уменьшается по линейному закону. Участки 1, 3, 5, 7 характеризуются линейным изменением ускорения (замедления), когда рывок остается постоянным, а скорость изменяется по параболическому закону.

По известному моменту инерции J системы электропривода лифта можно построить график $Jd\omega/dt = f(t)$, так как $d\omega/dt$ известна.

Таким образом, имеются все данные для построения графика $M(t)$:
 $M(t) = M_c + Jd\omega/dt$.

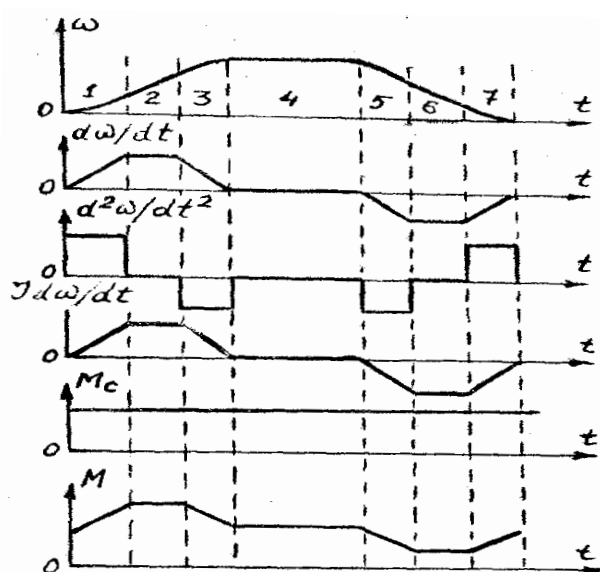


Рис. 5.4. К построению нагрузочной диаграммы ЭП пассажирского лифта

На основании графиков $M(t)$ и $\omega(t)$ можно построить зависимость $P(t) = M(t) \cdot \omega(t)$ и далее перейти к выбору электродвигателя по мощности, если по данной методике будут построены нагрузочные графики и для других участков движения кабины лифта.

Методы расчета мощности электродвигателя при переменной нагрузке. В электроприводах, у которых мощность на валу электродвигателя изменяется по определенному нагрузочному графику (рис. 5.5), электродвигатель сначала *выбирают по наибольшей мощности* этого графика с учетом его перегрузки, а затем выбранный электродвигатель *проверяют по нагреву*. Примерами электропривода с переменной нагрузкой на валу электродвигателя являются электроприводы многооперационных станков, кулачковых автоматов и др. Форма нагрузочного графика зависит от обрабатываемой детали, мощности и продолжительности отдельных переходов цикла обработки детали. При этом электродвигатель вращается непрерывно почти с постоянной скоростью, так как его механическая характеристика имеет большую жесткость.

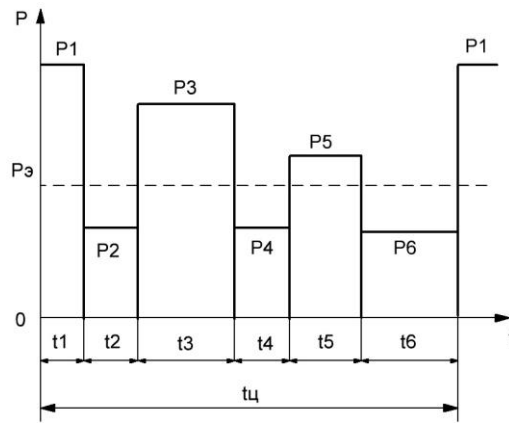


Рис. 5.5. Нагрузочный график при переменной нагрузке

Для проверки выбранного электродвигателя по нагреву при переменной нагрузке существуют следующие четыре метода:

- 1) метод эквивалентного тока I_3 ;
- 2) метод эквивалентного момента M_3 ;
- 3) метод эквивалентной мощности P_3 ;
- 4) метод средних (эквивалентных) потерь.

Рассмотрим эти методы.

Метод средних (эквивалентных) потерь. При переменной нагрузке (в станкостроении и других областях) наиболее часто используют обычные электродвигатели, предназначенные для длительного режима работы с постоянной нагрузкой. Поэтому электродвигатель выбирают на такую постоянную мощность P_3 длительного режима работы, при которой в электродвигателе выделяется столько же тепла за время цикла работы $t_{ц}$, сколько и при работе при переменной нагрузке:

$$Q_3 \cdot t_{ц} = \sum(Q_i \cdot t_i) \quad \text{или} \quad \Delta P_3 \cdot t_{ц} = \sum(\Delta P_i \cdot t_i),$$

где Q_3 – количество тепловой энергии, выделяемой в электродвигателе мощностью P_3 в единицу времени;

ΔP_3 – потери мощности в электродвигателе при работе с мощностью P_3 ;

ΔP_i – потери мощности в электродвигателе при работе с мощностью P_i .

Отсюда получаем формулу средних потерь:

$$\Delta P_3 = \sum(\Delta P_i \cdot t_i) / t_{ц}. \quad (5.7)$$

Метод средних (эквивалентных) потерь для проверки электродвигателя по нагреву, предварительно выбранного по перегрузке, основан на использовании этой формулы средних потерь и состоит в следующем:

1. Используя нагрузочный график, определяют:

$$\Delta P_i = P_i / \eta_i - P_i,$$

где η_i – КПД электродвигателя при работе с мощностью P_i .

В достаточно подробных технических данных АД приводят значения КПД при нагрузках 1/4, 2/4, 3/4, 4/4 и 5/4 от $P_{н}$. По этим данным строят график $\eta = f(P)$, из которого определяют значения η_i .

Для приближенных расчетов (и при отсутствии данных для построения графика $\eta = f(P)$) можно использовать формулу

$$\eta_i \approx \eta_{н} \sqrt[3]{P_i / P_{н}}.$$

2. Вычисляют ΔP_3 по формуле (5.3) и проверяют выполнение условия

$$\Delta P_3 \leq \Delta P_n.$$

Если это условие не выполняется, берут следующий по номинальной мощности электродвигатель из каталога и т.д. до выполнения данного условия.

Метод эквивалентного тока. Если в формуле (5.3) потери мощности разделить на *постоянные* и *переменные*, пропорциональные квадрату тока нагрузки I^2 , получим

$$\Delta P_{\text{пост}} + b \cdot I_3^2 = \sum((\Delta P_{\text{пост}} + b \cdot I_i^2) \cdot t_i) / t_{\text{ц}}, \quad (5.8)$$

где b – величина, постоянная для конкретного двигателя.

Так как $\Delta P_{\text{пост}} \cdot t_{\text{ц}} = \Delta P_{\text{пост}} \cdot \sum t_i$, то после преобразований и решения (5.8) относительно I_3 получим

$$I_3 = \sqrt{\sum(I_i^2 \cdot t_i) / t_{\text{ц}}}. \quad (5.9)$$

Эта формула соответствует нагрузочному графику (см. рис. 5.5) с прямоугольными участками. Если нагрузочный график $I = f(t)$ содержит треугольные и трапециевидальные участки (рис. 5.6), в формулу (5.5) вместо I_1 и I_5 следует подставлять

$$I_{13} = I_1 / \sqrt{3}; \quad I_{53} = \sqrt{(I_4^2 + I_4 \cdot I_5 + I_5^2) / 3}.$$

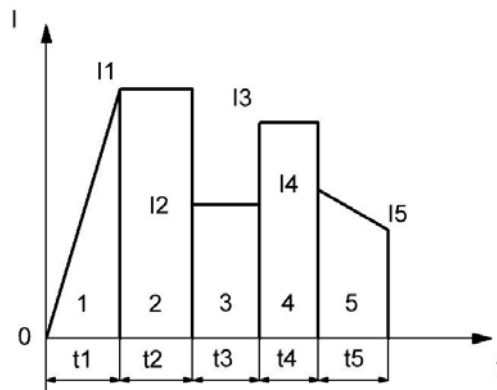


Рис. 5.6. Нагрузочный график $I = f(t)$

Метод эквивалентного тока основан на использовании формулы (5.5) при проверке электродвигателя по нагреву и состоит в следующем:

Рассчитывают I_3 по (5.5), используя нагрузочный график $I = f(t)$.

По каталогу (зная предварительно род тока, напряжение, скорость вращения и другие данные) выбирают электродвигатель с номинальным током $I_n \geq I_3$.

Данный метод применим к электродвигателю любого типа.

Метод эквивалентного момента. Для ДПТ НВ и АД метод эквивалентного тока можно заменить методом эквивалентного момента, использующего формулу эквивалентного момента

$$M = \sqrt{\sum(M_i^2 \cdot t_i) / t_{\text{ц}}}, \quad (5.10)$$

так как для ДПТ при $\Phi = \text{const}$ ток пропорционален моменту, а для АД при небольших значениях скольжения (на рабочем участке) момент можно считать примерно пропорциональным току.

Метод эквивалентной мощности. Если скорость вращения электродвигателя во время работы изменяется незначительно, что характерно для электродвигателей с жесткими механическими характеристиками, то мощность примерно пропорциональна моменту. Тогда можно пользоваться методом эквивалентной мощности, использующим формулу эквивалентной мощности,

$$P_3 = \sqrt{\sum(P_i^2 \cdot t_i) / t_{\Sigma}} \quad (5.11)$$

Эта формула более удобна, чем формула средних потерь, в которой необходимы дополнительные вычисления КПД η_i .

Данный метод используют также и при небольшом числе пусковых процессов (до 20 в час), пренебрегая их влиянием на нагрев электродвигателя.

5.3. Расчет номинальной мощности электродвигателя при длительном режиме работы

А. Нагрузка постоянная. Если электродвигатель должен работать с постоянной или мало изменяющейся нагрузкой (электроприводы насосов, вентиляторов, конвейеров, крупных металлорежущих станков), его мощность рассчитывается по эмпирическим формулам с учетом поправочных коэффициентов.

Примеры таких формул:

1. Если известны усилие резания F (Н) и скорость резания V (м/мин), то мощность электродвигателя P (кВт) на валу (с учетом потерь в механических передачах)

$$P = F \cdot V / (1000 \cdot 60 \cdot \eta_{\text{пер}}).$$

2. Для электропривода насоса

$$P = k_3 \cdot Q \cdot H \cdot \gamma \cdot 10^{-3} / (\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{пер}}), \text{ кВт},$$

где Q – производительность, м³/с;

H – высота напора, м;

γ – плотность жидкости, Н/м³;

$k_3 = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент запаса;

$\eta_{\text{нас}} = 0,45 \div 0,75$ – КПД насоса.

По каталогу выбирается электродвигатель с номинальной мощностью $P_n \geq P$. Тип двигателя выбирается с учетом окружающей среды, сопряжения с механизмом, рода тока, напряжения, скорости вращения и других технических требований (по пусковому моменту, например). Так как двигатель выбирается по условию $P_n \geq P$, то выполняются и условия $\Delta P_n \geq \Delta P$ и $\tau_y \leq \tau_{\text{доп}}$. Поэтому *при постоянной продолжительной нагрузке дополнительных расчетов по определению нагрева двигателя не требуется.*

Б. нагрузка переменная. При продолжительном режиме работы с переменной нагрузкой электродвигатель должен быть выбран по мощности так, чтобы он мог работать с наибольшей из графика нагрузки мощностью (это так называемый выбор по перегрузке) и не перегревался больше нормы (это выбор по нагреву). Из двух мощностей выбирают большую.

Мощность по перегрузке определяется как

$$P_1 = P_{\text{max}} / \lambda, \quad (5.12)$$

где P_{max} – наибольшая мощность из графика нагрузки;

λ – коэффициент допустимой перегрузки:

для ДПТ $\lambda = 1,8 \dots 2,5$ (из условий коммутации);

для АД $\lambda = 0,9^2 \cdot \lambda_k$ ($\lambda_k = M_k / M_n$ – берется из каталога);

коэффициент 0,9 учитывает возможность снижения напряжения сети на 10 % от номинального.

Обычно сначала рассчитывают мощность электродвигателя по нагреву и выбирают конкретный двигатель (с учетом и других критериев выбора), а затем проверяют его по перегрузке $P_n \geq P_1$.

Если это условие перегрузки не соблюдается, из каталога выбирают следующий по шкале мощностей электродвигатель.

Примечание. Для АД нужна еще проверка и по пусковым условиям, для чего сопоставляется его пусковой момент M_n с моментом нагрузки при пуске M_1 :

$$0,9^2 \cdot M_n \geq M_1, \quad (5.13)$$

где M_1 – момент на первом участке нагрузочного графика.

Если выбранный двигатель удовлетворяет всем условиям проверки, то он принимается к применению в данном ЭП, а иначе выбирается другой двигатель (как правило, большей мощности) и проверка повторяется.

5.4. Расчет номинальной мощности электродвигателя при повторно-кратковременном и кратковременном режимах работы

Для повторно-кратковременного режима работы выпускаются специальные серии электродвигателей. В каталогах на них указывается номинальная мощность P_n при нормативной (стандартной) продолжительности включения $ПВ_n = 15, 25, 40, 60$ и 100% . Длительность рабочего цикла $t_{ц}$ для них не должна превышать 10 мин, а иначе двигатель считается работающим в длительном режиме.

Если при повторно-кратковременном режиме расчетная мощность $P_э$ и фактическая продолжительность включения $ПВ_ф$ равны (или очень близки к номинальным данным двигателя), то *проверка его по нагреву не требуется*, поскольку работа при таких параметрах нагрузочной диаграммы гарантируется заводом-изготовителем. Но когда $ПВ_ф$ заметно отличается от $ПВ_n$, *проверка двигателя по нагреву необходима* и проводится следующим образом:

- 1) по заданной нагрузочной диаграмме рассчитывают $ПВ_ф$ и эквивалентную мощность $P_э$ (по одному из методов эквивалентных величин);
- 2) приводят рассчитанную мощность $P_э$ к ближайшей нормативной величине $ПВ_n$ по формуле $P'_э = P_э \sqrt{ПВ_ф / ПВ_n}$;
- 3) по каталогу подбирают электродвигатель, номинальная мощность которого $P_n \geq P'_э$, а номинальное значение угловой скорости ω_n и исполнение соответствуют требуемым. Далее выбранный двигатель проверяют на перегрузочную способность (и по пусковым условиям для АД), как и для двигателей при продолжительном режиме работы с переменной нагрузкой.

От электродвигателя, предназначенного для продолжительного режима работы, но используемого для повторно-кратковременной нагрузки, требуется, чтобы он развивал необходимую наибольшую мощность при обработке детали и не перегревался свыше нормы при обработке любого числа деталей. Поэтому мощность электродвигателя в данном случае рассчитывают по перегрузке и по нагреву, как и для продолжительного режима с переменной нагрузкой, при этом для расчета номинальной мощности двигателя по нагреву могут быть использованы методы эквивалентного тока, эквивалентного момента и средних потерь (метод эквивалентной мощности здесь не применим, так как в течение всего времени

цикла не соблюдается пропорциональность между током электродвигателя и его мощностью).

Для подъемно-транспортных механизмов следует выбирать специальные крановые электродвигатели, так как они предназначены для использования в тяжелых условиях работы (частые пуски, торможения, колебания нагрузки, превышающие номинальную) и имеют повышенные максимальный и пусковой моменты. Один и тот же электродвигатель для разных ПВ имеет различную номинальную мощность: чем больше ПВ, тем меньше мощность. Пересчет номинальной мощности электродвигателя с одного значения ПВ на другое осуществляется на основе приближенного равенства

$$P_{15}^2 \cdot \text{ПВ}_{15} \approx P_{25}^2 \cdot \text{ПВ}_{25} \approx P_{40}^2 \cdot \text{ПВ}_{40} \approx P_{60}^2 \cdot \text{ПВ}_{60}.$$

Повторно-кратковременный режим характерен и для электроприводов металлорежущих станков, обрабатывающих однотипные детали, когда цикл содержит паузы, необходимые для смены заготовки и измерений детали. Мощность электродвигателя при этом целесообразно определять по методу (формуле) средних потерь:

$$\Delta P_3 = \sum \Delta A_i / t_{\text{ц}}, \quad (5.14)$$

где ΔA_i – потери энергии на каждом значении нагрузки, включая процессы пуска и торможения.

Когда электродвигатель не работает (t_0 на рис. 5.9), условия его охлаждения значительно ухудшаются. Это обстоятельство учитывают введением экспериментальных коэффициентов ($\beta_0 < 1$) ухудшения охлаждения, умножая время t_0 на β_0 . Тогда в (5.6) знаменатель уменьшается, а эквивалентные потери и номинальная мощность электродвигателя увеличиваются.

У АД защищенного исполнения с $n_0 = 1500$ об/мин и $P_n = 1 \dots 100$ кВт коэффициент $\beta_0 = 0,5 \dots 0,2$ (с увеличением P_n коэффициент β_0 убывает), у АД с обдувом $\beta_0 = 0,45 \dots 0,3$, у закрытых АД $\beta_0 = 0,98 \dots 0,93$.

Во время пуска и торможения средняя скорость вращения электродвигателя ниже номинальной, охлаждение двигателя ухудшается. Поэтому в формуле (5.6) ухудшение охлаждения учитывается путем умножения времени пуска $t_{\text{п}}$ и торможения $t_{\text{т}}$ на коэффициент

$$\beta_1 = (1 + \beta_0) / 2. \quad (5.15)$$

Расчет номинальной мощности электродвигателя при кратковременном режиме работы. Вспомогательные электроприводы станков (установочные перемещения суппортов, бабок, поперечин и др.) обычно работают в кратковременном режиме нагрузки. Продолжительность работы вспомогательных приводов обычно не превышает 5...15 с (1...1,5 мин у крупных станков). За это время при перегрузке в допустимых пределах электродвигатель не успевает нагреться даже до нормального перегрева. Номинальную мощность электродвигателя в кратковременном режиме работы определяют только по условиям перегрузки, а затем проверяют по пусковому моменту. Мощность, расходуемая на преодоление сил трения при перемещении горизонтально движущегося узла:

$$P_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot v \cdot 10^{-3} = G \mu \cdot v \cdot 10^{-3} \text{ кВт}, \quad (5.16)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения, Н;

v – скорость, м/с;

G – сила тяжести (вес) перемещаемого узла, Н;

μ – коэффициент трения движения.

Мощность на валу электродвигателя

$$P_H = P_{тр} / (\lambda \cdot \eta) = P_1 / \lambda, \quad (5.17)$$

где λ – коэффициент допустимой перегрузки; P_1 – потребляемая мощность.

Приближенно можно считать, что характеристика АД в рабочей части прямолинейна. Тогда угловая скорость электродвигателя при работе с перегрузкой

$$\omega_\lambda = \omega_0 \cdot (1 - \lambda \cdot s_H), \quad (5.18)$$

где $\omega_0 = \pi n_0 / 30$ – синхронная угловая скорость АД;

s_H – номинальное скольжение.

Момент АД при перегрузке

$$M = P_1 \cdot 10^3 / (\omega_0 \cdot (1 - \lambda \cdot s_H)). \quad (5.19)$$

Момент сил сопротивления в начале пуска больше, чем во время его работы:

$$M_{со} = P_1 \cdot 10^3 \cdot \mu_0 / (\omega_0 \cdot \mu \cdot (1 - \lambda \cdot s_H)), \quad (5.20)$$

где μ_0 – коэффициент покоя.

Выбор мощности АД сводится к следующему. Пользуясь формулой для P_H , по каталогу подбирают электродвигатель, затем вычисляют момент $M_{со}$ и сопоставляют его с пусковым моментом $0,9^2 \cdot M_H$. Если выполняется условие $0,9^2 \cdot M_H > M_{со}$, выбранный электродвигатель пригоден.

Тема 6. РАЗОМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

К разомкнутым относятся электрические схемы, в которых для управления ЭП не используются обратные связи по его координатам или технологическим параметрам приводимых в движение рабочей машины или производственного механизма. Эти схемы, отличаясь простотой своей реализации, широко применяются там, где не требуется высокое качество управления движением ЭП, например, для пуска, реверса и торможения двигателей.

Разомкнутые схемы, осуществляя управление ЭП, обеспечивают и защиту самого ЭП, питающей сети и технологического оборудования при возникновении различных ненормальных режимов работы - коротких замыканий, перегрузок двигателей, исчезновения питающего напряжения или обрыва фазы питающей сети и др. Для такой защиты применяются соответствующие аппараты и устройства, находящиеся во взаимодействии с устройствами управления двигателями. В разомкнутых схемах управления главным образом используется релейно-контакторная аппаратура, в состав которой входят командные маломощные аппараты, силовые коммутационные аппараты с ручным и дистанционным управлением, а также реле управления и защиты.

6.1. Электрические аппараты ручного и дистанционного управления

К электрическим аппаратам ручного управления относятся командные маломощные устройства (кнопки и ключи управления, командоаппараты) и силовые коммутационные аппараты (рубильники, пакетные выключатели и силовые контроллеры).

Кнопки управления предназначены для подачи оператором управляющего воздействия на ЭП. Они различаются по размерам (нормальные и малогабаритные), по числу замыкающих и размыкающих контактов, по форме толкателя. Несколько кнопок (2, 3 и более), смонтированных в одном корпусе, образуют *кнопочную станцию*.

Кнопки управления на электрических схемах обозначаются:

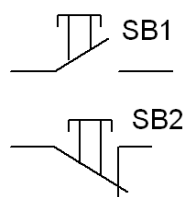


Рис. 6.1. Обозначение кнопок управления

Контакты на схемах изображаются в «нормальном» состоянии электрических аппаратов, когда на них не оказывается механического, электрического, магнитного или другого воздействия.

Особенность кнопок управления – возвращаются в исходное положение после снятия воздействия.

Выпускаются кнопки серий КУ120 и КЕ: для работы в цепях переменного тока с $U \leq 500$ В и цепях постоянного тока с $U \leq 220$ В и током $I \leq 4$ А.

Ключи управления предназначены для подачи управляющего воздействия в ЭП и имеют 2 и более фиксированных положений рукоятки и несколько замкнутых и разомкнутых контактов.

Ключи управления серии КЕ выпускаются на те же напряжения и токи, что и кнопки управления. Универсальные переключатели УП 5300, УП 5400 и ПКУ 3 используются для коммутации цепей катушек контакторов, масляных выключателей, управления многоскоростных АД и др.

Командоконтроллеры (командоаппараты) служат для коммутации нескольких маломощных (ток нагрузки до 16 А) электрических цепей. Эти аппараты, имеющие ручное управление от рукоятки или педали с несколькими положениями, находят широкое применение в схемах управления ЭП крановых механизмов, металлургического оборудования, на транспорте.

Командоаппараты классифицируются по числу коммутируемых цепей, виду привода контактной системы, числу рабочих положений рукоятки (педали), диаграммам включения и выключения контактов. Их электрическая схема изображается аналогично схеме ключей управления и переключателей.

Командоаппараты общепромышленного назначения серий КА 410 А, КА 420 А, КА 4000, КА 4100, КА 4200, КА 4500, КА 4600, КА 11 предназначены для коммутации цепей постоянного тока напряжением до 440 В и переменного тока напряжением до 500 В. Командоконтроллеры серий ККП 1000 и ККП 423 используются для управления ЭП крановых механизмов и металлургического оборудования.

Рубильники это простейшие силовые коммутационные аппараты, которые в основном предназначены для неавтоматического нечастого замыкания и размыкания силовых электрических цепей двигателей постоянного и переменного тока напряжением до 500 В и током до 5000 А. Они различаются по силе коммутируемого тока, числу полюсов (коммутируемых цепей), виду привода рукоятки и числу ее положений (два или три). Рубильники серий Р и РА рассчитаны на токи 100...600 А, напряжения 220...660 В и имеют 1...3 полюса.

Пакетные выключатели - это разновидность рубильников. Их контактная система набирается из отдельных пакетов по числу полюсов (коммутируемых цепей). Пакет состоит из изолятора, в пазах которого находятся неподвижный контакт с винтовыми зажимами для подключения проводов и пружинный подвижный контакт с устройством искрогашения.

Выпускаемые пакетные выключатели серий ПВМ, ППМ, ПУ, УП, ОКП, ПВП и предназначены для коммутации электрических цепей постоянного тока до 400 А напряжением до 220 В и переменного тока до 250 А напряжением до 380 В.

Контроллеры - это многопозиционные электрические аппараты с ручным или ножным приводом для непосредственной коммутации силовых цепей двигателей постоянного и переменного тока. В ЭП используются контроллеры двух видов - кулачковые и магнитные.

В кулачковых контроллерах размыкание и замыкание контактов обеспечивается смонтированными на барабане кулачками, поворот которых осуществляется с помощью рукоятки, маховичка или педали. За счет профилирования кулачков обеспечивается необходимая последовательность коммутации контактных элементов.

В крановых ЭП используются кулачковые контроллеры серии ККТ-60А для управления асинхронными двигателями, рассчитанными на напряжение до 380 В, и серии КВ 100 для управления двигателями постоянного тока напряжением до 440 В. Такие контроллеры имеют до 12 силовых контактов, рассчитанных на номинальные токи до 63 А, а также маломощные контакты для коммутации цепей управления. Число позиций их рукояток (маховиков) может достигать шести в каждую сторону от среднего (нулевого) положения.

Магнитные контроллеры представляют собой коммутационные устройства, в состав которых входят командоконтроллер и силовые электромагнитные аппараты - контакторы. Командоконтроллер с помощью своих контактов управляет катушками контакторов, которые в свою очередь осуществляют коммутацию силовых цепей двигателей. Применение такого контроллера вместо кулачкового позволяет повысить степень автоматизации ЭП, производительность рабочей машины и улучшить условия труда оператора (так как управление ЭП с помощью командоконтроллера или кнопочной станции не требует от него приложения больших усилий). Срок службы магнитных контроллеров при одних и тех же условиях также существенно выше, чем кулачковых, что объясняется высокими коммутационной способностью и износостойкостью электромагнитных контакторов.

Магнитные контроллеры нашли основное применение в ЭП крановых механизмов, работа которых характеризуется частым включением двигателей. В ЭП крановых механизмов для металлургического производства применяются магнитные контроллеры серий К, рассчитанные на номинальные токи контакторов до 250 А, и КС, рассчитанные на токи до 400 А, а в кранах общего назначения - контроллеры серий ТА (токи до 160 А) и ТСА (токи до 250 А).

Главная цепь контроллеров рассчитывается на переменный ток напряжением 220 и 380 В, а цепи управления - на постоянный ток напряжением 220 В (серии К и КС) и на переменный ток с напряжением силовой цепи (серии ТА и ТСА).

К аппаратам дистанционного управления относятся контакторы, магнитные пускатели и реле, коммутация контактов которых осуществляется при подаче на их катушки электрического сигнала (напряжения или тока) и снятии этого сигнала.

Контактор представляет собой электромагнитный аппарат, предназначенный для частых дистанционных коммутаций силовых цепей двигателей. Контакторы различаются по роду тока коммутируемой цепи, числу главных контактов (одно-, двух- и многополюсные), роду тока цепи катушки (управление постоянным или переменным токами), номинальным току и напряжению коммутируемых цепей, конструктивному исполнению и другим признакам.

Устройство однополюсного контактора постоянного тока показано на рис. 6.2, а. На неподвижном сердечнике 14 магнитной системы контактора установлена втягивающая катушка 12. С подвижной частью магнитной системы (якорем 8) связан подвижный главный контакт 5, который присоединяется к цепи тока при помощи гибкого проводника 7. При подаче напряжения на катушку 12 (замыкании контакта 13) якорь притягивается к сердечнику и контакт 5 замыкается с неподвижным главным контактом 7, что обеспечивает коммутацию тока 1.

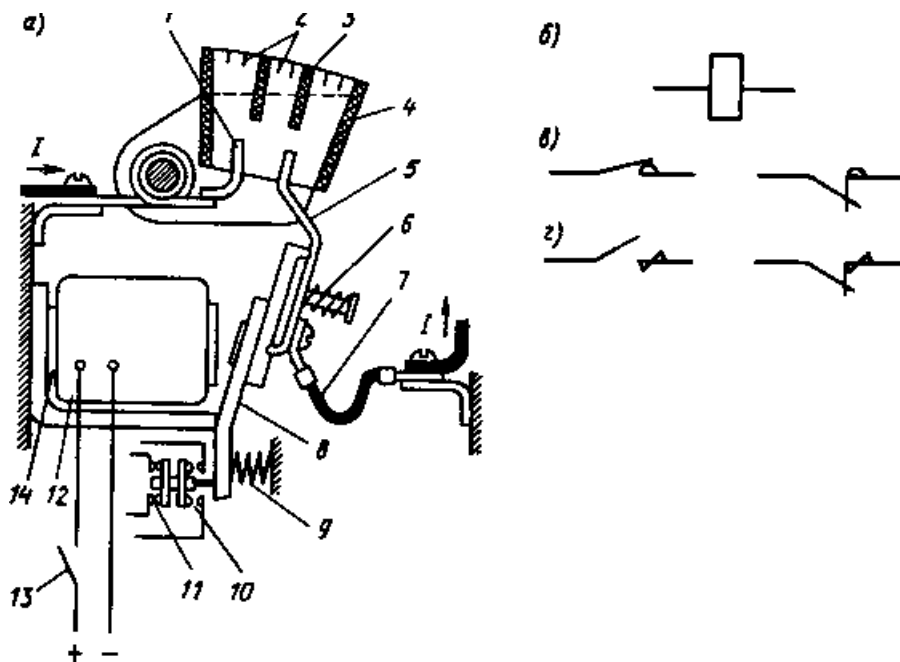


Рис. 6.2. Устройство однополюсного контактора постоянного тока и условные обозначения элементов контактора

Необходимое нажатие главных контактов в их рабочем положении обеспечивается пружиной 6. В процессе соприкосновения контактов 7 и 5 происходит их перекатывание и притирание, что уменьшает переходное сопротивление контакта.

С якорем 8 связаны также вспомогательные (блокировочные) контакты мостикового типа - замыкающие 10 и размыкающие 11, предназначенные для работы в цепях управления и рассчитанные на небольшие токи. Блокировочные контакты 10 замыкаются и 11 размыкаются одновременно с замыканием главных контактов.

Отключение контактора производится снятием напряжения с катушки 12 (контакт 13 размыкается), при этом его подвижная система под действием силы тяжести и возвратной пружины 9 возвращается в «нормальное» состояние. Возникающая при размыкании главных контактов электрическая дуга гасится в щелевой дугогасительной камере 4, изготовленной из жаростойкого изоляционного материала. Для ускорения гашения дуги могут применяться камеры с изоляционными перегородками 3, а также иногда устанавливается искрогасительная решетка из коротких металлических пластин 2.

Контакторы постоянного тока изготавливаются с одним или двумя полюсами на номинальные токи главных контактов от 4 до 2500 А. Главные контакты способны отключать токи перегрузки 7...10-кратные номинальному току. Катушки контакторов постоянного тока имеют большое количество витков и обладают значительной индуктивностью, что затрудняет размыкание их цепей. Мостиковые блокировочные контакты могут отключать токи до 20 А при напряжении до 500 В в цепях катушек аппаратов переменного тока, а в цепях катушек аппаратов постоянного тока - токи до 2,5 А при 110 В, до 2 А при 220 В и до 0,5 А при 440 В.

На рис. 6.2, б, в, г показаны соответственно условные обозначения элементов контактора: втягивающей катушки; замыкающих и размыкающих главных контактов без дугогашения и с дугогашением.

В настоящее время выпускается несколько серий контакторов постоянного

тока. Для тяжелых условий работы, в частности для крановых ЭП, предназначаются контакторы серий КПВ 600 и КПВ 620 с одним главным контактом, рассчитанным на токи от 100 до 630 А. Для применения в ЭП постоянного тока общепромышленного назначения выпускаются контакторы серий КП и КПД с одним или двумя главными контактами, рассчитанными на токи от 25 до 250 А. Контактторы этих серий имеют магнитную систему клапанного типа, главные контакты пальцевого типа и вспомогательные контакты мостикового типа. Контактторы снабжены также дугогасительной системой.

Контакторы переменного тока по принципу своего действия и основным элементам конструкции не отличаются от контакторов постоянного тока. Особенностью их работы является питание катушки переменным током, что определяет повышение тока в ней при срабатывании в несколько раз по сравнению с током при не втянутом якоре. По этой причине для контакторов переменного тока ограничивается число их включений в час (обычно не более 600). Кроме того, пульсирующий магнитный поток, создаваемый переменным током катушки, вызывает вибрацию и гудение магнитопровода, а также его повышенный нагрев. Для уменьшения этих нежелательных факторов магнитопровод набирают из тонколистовой трансформаторной стали, а на сердечник или якорь помещают короткозамкнутый виток.

В контакторах переменного тока проще условия гашения дуги, которая в этом случае менее устойчива и может погаснуть при прохождении переменного тока нагрузки через ноль.

Контакторы переменного тока на электрических схемах обозначаются так же, как и контакторы постоянного тока.

Контакторы переменного тока серий КТ 6000, КТ 7000, КТП 600, рассчитанные на токи от 63 до 1000 А, имеют от двух до пяти главных контактов. Их катушки выполняются на напряжение переменного тока от 36 до 500 В. Модификацией этих серий являются контакторы серий КТ 64, КТП 64, КТ 65 и КТП 65, в которых бездуговая коммутация осуществляется шунтированием главных контактов тиристорами во время их размыкания. Отсутствие дуги при отключении контакторов повышает их надежность, износостойкость главных контактов и взрывобезопасность, что позволяет, в частности, увеличить допустимое число их включений до 2000 в час.

Универсальными, т.е. служащими для коммутации силовых цепей как постоянного, так и переменного тока, являются контакторы серии МК. Такие контакторы обеспечивают коммутацию тока до 63 А в цепях постоянного тока напряжением до 440 В и в цепях переменного тока напряжением до 660 В, имея число главных контактов от 1 до 3. Втягивающие катушки их рассчитаны на постоянный ток напряжением 24, 48, 110 и 220 В.

Магнитный пускатель представляет собой специализированный комплексный аппарат, предназначенный главным образом для управления трехфазными асинхронными двигателями, т. е. для их подключения к сети, отключения, обеспечения тепловой защиты и сигнализации о режимах работы. В соответствии с функциями пускателя в него могут входить контактор, кнопки управления, тепловые реле защиты, сигнальные лампы, размещаемые в одном корпусе. Магнитные пускатели различаются по назначению (неревверсивные и реверсивные), наличию или отсутствию тепловых реле и кнопок управления, степени защиты от воз-

действия окружающей среды, уровням коммутируемых токов, рабочему напряжению главной цепи.

Пускатели серии ПМЛ выпускаются на токи от 10 до 200 А, допустимое число включений пускателя 1...5 габаритов составляет 3600 в час, а для 6... 7 габаритов - 2400.

Пускатели серии ПМС предназначены для управления АД серии 4А и имеют шесть типоразмеров на токи от 10 до 160 А. Для обеспечения требуемых функций они могут иметь разделительный трансформатор, кнопки управления, амперметр, сигнальную лампу. Их механическая износостойкость составляет $(10...16)10^6$ циклов, а частота включений в час - 6000 для пускателей первого габарита и 2400 - для пускателей пятого и шестого габаритов.

Электромагнитное реле представляет собой аппарат, предназначенный для коммутации слаботочных цепей управления ЭП в соответствии с электрическим сигналом, подаваемым на его катушку. Область применения реле очень широкая. Они используются в качестве датчиков тока и напряжения, а также как промежуточные элементы для передачи команд из одной цепи в другую и размножения сигналов, как датчики времени, выходные элементы различных датчиков координат ЭП и датчики технологических параметров рабочих машин и механизмов. Другими словами, они выполняют самые разнообразные функции управления, контроля, защиты и блокировок в автоматизированном ЭП. Электромагнитное реле действует аналогично контактору (рис. 6.3). На сердечнике 2 магнитной системы реле находится катушка 1, на которую подается входной электрический сигнал. Когда ток (напряжение) в цепи катушки превышает некоторое значение, называемое током (напряжением) срабатывания реле, создаваемая им электромагнитная сила становится больше противодействующей силы возвратной пружины 10, якорь 3 реле притягивается к сердечнику 2 и траверса 6, поднявшись, обеспечивает замыкание контактов 8 и размыкание контактов 7. Сила нажатия в контактах создается пружиной 9. Если уменьшить (отключить) ток (напряжение) в катушке, то якорь под действием пружины 10, перейдет в исходное положение и контакты 7,8 вернуться в нормальное (исходное) положение. Ток (напряжение), при котором якорь реле возвращается в исходное положение, называется током (напряжением) возврата или отпускания, а отношение тока (напряжения) возврата к току (напряжению) срабатывания - коэффициентом возврата реле.

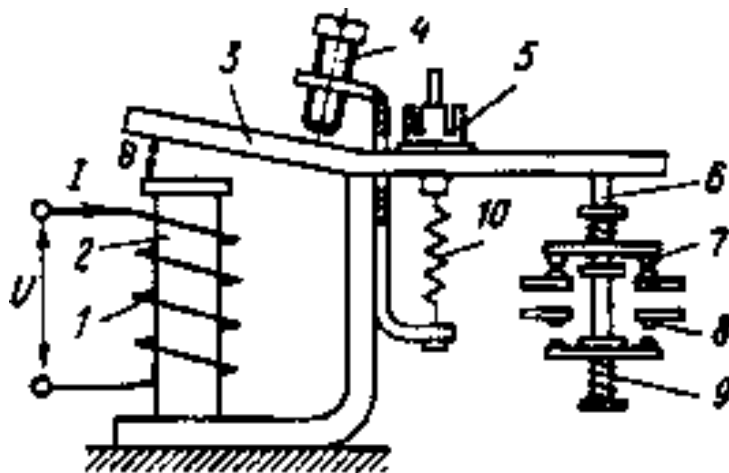


Рис. 6.3. Электромагнитное реле
конструкцию без использования дугогасительных камер.

Ток (напряжение) срабатывания реле можно регулировать в определенных пределах изменением силы натяжения возвратной пружины 10 с помощью гайки 5, а также за счет зазора 5, регулируемого с помощью винта 4. При затяжке пружины 10 или увеличении зазора 8 ток (напряжение) срабатывания возрастает.

Поскольку контакты реле коммутируют небольшие (5..10 А) токи, они обычно имеют простую

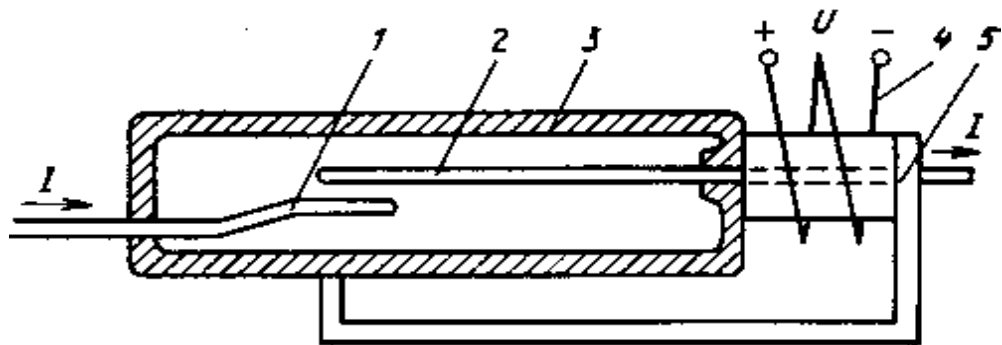


Рис. 6.4. Устройство простейшего реле с герметичным контактом - герконом

Электромагнитные реле постоянного тока серий РЭВ 800 применяются в схемах управления в качестве реле тока, напряжения, времени и промежуточных реле, а серия РЭВ 310 - в качестве реле тока и напряжения. Реле этих серий имеют катушки на напряжение от 12 до 220 В и от одного до четырех контактов.

В качестве промежуточных применяются также реле серий РП-250, РП-321, РП-341, РП-42 и ряд других, которые также могут использоваться и как реле напряжения.

Герконовые электромагнитные реле имеют герметизированные контакты, что повышает их износостойкость и надежность в работе. Рассмотрим устройство простейшего реле с герметичным контактом - герконом (рис. 6.4). Внутри стеклянной герметизированной капсулы 3, наполненной инертным газом, находятся неподвижный 1 и подвижный 2 контакты, изготовленные из сплава железа с никелем. Капсула 3 охвачена магнитопроводом 5, на части которого располагается катушка 4.

Если на катушку 4 подать постоянный ток напряжением U , то он создаст в магнитопроводе 5 и контактах 1 и 2 магнитный поток, под воздействием которого конец подвижного контакта 2 переместится вниз и замкнется с контактом 1, в результате чего цепь коммутируемого тока I замкнется.

При снятии напряжения с катушки магнитный поток исчезнет и упругий контакт 2 вернется в исходное положение, разомкнув цепь. Износоустойчивость реле с герконами, способных коммутировать токи до 5 А при напряжении до 100 В, достигает нескольких десятков миллионов срабатываний.

Реле серий РЭС 42, РЭС 43, РЭС 44, РЭС 55 на базе герконов типа КЭМ допускают коммутацию токов до 1 А при напряжении до 220 В.

6.2. Датчики времени, скорости, тока и положения

Для управления электроприводом, в том числе и разомкнутым, необходима информация о текущих значениях скорости, тока, момента и координат, а также о времени. Устройства, которые выдают подобную информацию в виде электрических сигналов, получили название датчиков.

Датчики времени. При построении схем управления ЭП по принципу времени в качестве датчиков используются различные реле времени – электромагнитные, моторные, электронные, анкерные и механические. Рассмотрим кратко их принципы действия и основные технические характеристики.

Электромагнитное реле времени (рис. 6.5) состоит из неподвижной части магнитопровода 2, на котором установлена катушка 1, и подвижной части магнитной системы - якоря 6 с контактами 8 и 9. При отсутствии напряжения на ка-

тушке якорь δ с помощью пружины 4 удерживается в поднятом положении.

Особенностью конструкции реле времени является наличие на магнитопроводе 2 массивной медной трубки 3 (гильзы), которая и обеспечивает выдержку времени при отключении катушки реле от источника питания. Рассмотрим этот процесс подробнее.

Реле времени включается, как и обычное электромагнитное реле, подачей напряжения U на катушку 1 при замыкании контакта 10 . При этом якорь δ , притягиваясь к сердечнику, осуществляет без выдержки времени переключение контактов 8 и 9 . Необходимая выдержка времени обеспечивается замедлением возврата якоря в исходное положение, так как при снятии с катушки напряжения спадающий магнитный поток создает в гильзе 3 вихревые токи, которые (правило Ленца) своим магнитным потоком поддерживают основной поток. Другими словами, наличие гильзы замедляет (демпфирует) спадание магнитного потока, а значит, и перемещение якоря и контактной системы в исходное (отключенное) положение. Таким образом обеспечивается выдержка времени при размыкании замыкающего контакта и замыкании размыкающего контакта (см. рис. 6.5, *б*).

Выдержка времени может регулироваться ступенчато за счет латунной немагнитной прокладки 7 определенной толщины, устанавливаемой на якорь δ (уменьшение толщины прокладки вызывает увеличение выдержки реле и наоборот), или плавно за счет изменения натяжения пружины 4 с помощью гайки 5 (чем меньше затянута пружина, тем больше выдержка времени и наоборот).

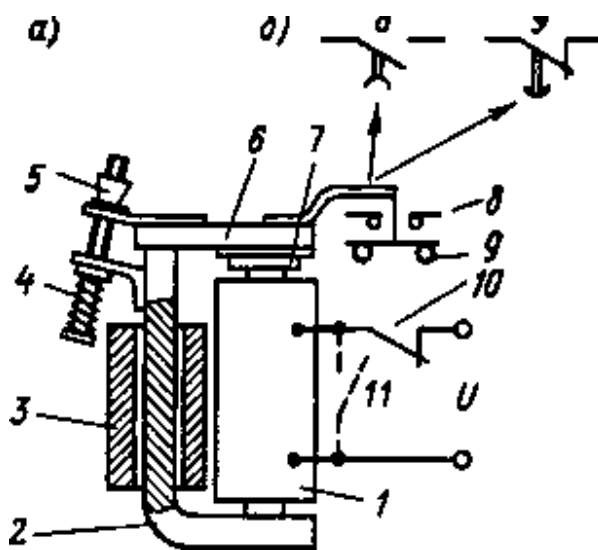


Рис. 6.5. Электромагнитное реле времени

Выдержку времени электромагнитным реле можно обеспечить без установки гильзы 3 , закорачивая катушку после отключения ее от сети. В этом случае замкнутый контур, образованный катушкой и замыкающим ее контактом 11 , будет играть роль электромагнитного демпфера. Однако выдержка времени в этом случае получается меньше, чем при использовании гильзы.

Реле серии РЭВ 811...РЭВ 818, обеспечивающие выдержку времени от 0,25 до 5,5 с, изготавливаются с катушками на напряжение постоянного тока 12, 24, 48, 110 и 220 В. Реле времени серии РЭВ 81 обеспечивают выдержку времени от 0,15 до 4 с.

Моторное (электрохимическое) реле времени состоит из специального

низкоскоростного двигателя и редуктора с большим передаточным числом, на выходном валу которого имеется рычаг, начальное положение которого устанавливается по шкале уставок времени. Рычаг управляет работой вспомогательных контактов, которыми включается выходное электромагнитное реле. Работает моторное реле времени следующим образом. Начало отсчета времени соответствует подаче напряжения на двигатель, который, включившись, начинает вращаться и медленно поворачивать рычаг на валу редуктора. Через заданное время, определяемое начальным положением, рычаг доходит до вспомогательных контактов и замыкает их, что приводит к включению выходного реле, которое одним из своих контактов отключает двигатель, завершая отсчет выдержки времени.

Моторные реле времени серий Е 510 и РБ 4 обеспечивают выдержку времени до нескольких минут.

В электронных реле времени обычно используются различные полупроводниковые элементы (чаще всего транзисторные) и конденсаторы, время разряда или заряда которых и определяет выдержку времени. Электронные реле времени серии ВЛ обеспечивают выдержку времени от 0,1 с до 10 мин.

В пневматических реле выдержка времени обеспечивается воздушным (пневматическим) замедлителем (демпфером), управляемым с помощью электромагнита. При подаче на электромагнит напряжения питания (начало отсчета времени) начинается процесс перекачки воздуха из одной камеры реле в другую через калиброванное дроссельное отверстие. Размер этого отверстия, а тем самым скорость перекачки и выдержка времени реле регулируются с помощью иглы, положение которой устанавливается посредством регулировочной гайки «больше - меньше». При окончании перекачки воздуха через отверстие происходит переключение установленного в реле микропереключателя, что определяет конец отсчета выдержки времени.

Серийные пневматические реле времени РВП 72 обеспечивают диапазон выдержки времени от 0,4 до 180 с.

Механическое реле времени имеет замедлитель в виде анкерного механизма, управляемого электромагнитом. При подаче напряжения на электромагнит (начало отсчета времени) его якорь заводит пружину анкерного механизма аналогично часовому. Последний, начав работать, перемещает подвижный контакт реле. По истечении заданного времени, определяемого положением (уставкой) неподвижного контакта реле, происходит замыкание контактной системы, что и определяет конец отсчета времени. Данные реле обеспечивают выдержку времени до нескольких десятков секунд.

Некоторые механические реле времени управляются не электромагнитом, а подвижной частью контактора. В этом случае запуск в работу анкерного механизма происходит сразу же после включения контактора. Такие реле времени получили название маятниковых.

Датчики скорости. Информацию о скорости ЭП можно получать как от различных датчиков скорости, так и от самого двигателя. Скорость двигателей постоянного и переменного тока определяет их электродвижущую силу. Таким образом, используя ЭДС в качестве измеряемой (контролируемой) переменной, можно получить информацию о скорости ЭП.

Электромеханическое реле контроля скорости (РКС) работает по принципу асинхронного двигателя. Ротор такого реле (рис. 6.6, а) представляет собой пост-

янный магнит 1, соединенный с валом двигателя, скорость которого измеряется. Постоянный магнит помещен внутри алюминиевого цилиндра 5, имеющего обмотку в виде беличьей клетки. Этот цилиндр может поворачиваться вокруг оси на небольшой угол и переключать с помощью упора 3 контакты 4 и 6. При неподвижном двигателе упор занимает среднее положение и контакты реле находятся в нормальном положении. При вращении двигателя, а следовательно, и магнита 1 даже с небольшой скоростью создается вращающий момент, под действием которого цилиндр 5 поворачивается и обеспечивает с помощью упора 3 переключение контактов 4. При скорости двигателя, близкой к нулю, цилиндр возвращается в среднее положение и контакты 4 переходят в свое нормальное состояние. Скорость, при которой переключаются контакты реле, определяется положением настроечных винтов 2.

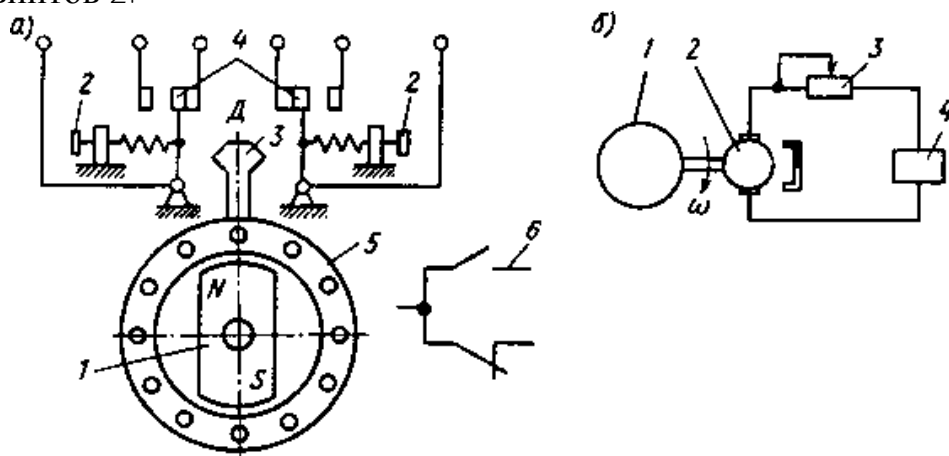


Рис. 6.6. Электромеханическое реле контроля скорости (а), пример его использования (б).

Реле контроля скорости удобно использовать при автоматизации процесса торможения, когда требуется обеспечить отключение двигателя от сети после снижения его скорости до нуля.

Тахогенератор (ТГ) как датчик скорости двигателя обычно применяется в различных схемах управления. Пример его использования в разомкнутой схеме иллюстрирует рис. 6.6, б. К якорю 2 тахогенератора подключена обмотка 4 реле напряжения, последовательно с которой включен регулировочный резистор 3. Реле срабатывает при определенной скорости двигателя 1 в зависимости от положения движка реостата 3 и своими контактами осуществляет коммутацию соответствующих цепей управления. Наибольшее применение в автоматизированных ЭП нашли тахогенераторы постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов серий ЭТ 4 и ЭТ 7; ТМГ-ЗОП; ТД 103-ПМ и ТД 201-ПМ; МЭТ 8155 и с обмоткой возбуждения серий ТГ, СЛ, ТД, а также асинхронные и синхронные тахогенераторы.

Датчики тока. В качестве датчиков тока в релейно-контакторных разомкнутых схемах используются главным образом реле тока. Их катушки, изготовленные из толстого провода с малым числом витков, непосредственно включаются в цепь контролируемого (регулируемого) тока двигателя. При достижении этим током уровней срабатывания или отпускания происходит коммутация контактов реле тока, которые производят соответствующие переключения в схемах управления двигателем.

Наиболее широко для этих целей применяются реле минимального и максимального токов серий РЭВ 830, РЭВ 312, РТ 40.

Сигнал, пропорциональный току двигателя, можно получить также с помощью шунта или непосредственно с обмотки дополнительных полюсов двигателя. Эти способы применяются при построении, главным образом, замкнутых схем автоматизированных ЭП. В некоторых схемах в качестве датчиков используются трансформаторы тока, что позволяет осуществить потенциальное разделение силовых цепей и цепей управления.

Датчики положения. К датчикам положения, которые широко используются в разомкнутых схемах управления ЭП, относятся путевые и конечные выключатели различных типов. При достижении ЭП или исполнительным органом рабочей машины определенных положений эти выключатели выдают сигналы, которые затем поступают в цепи управления, защиты и сигнализации. Конечные выключатели применяются для предотвращения выхода исполнительных органов из рабочей зоны (например, моста подъемного крана за пределы подкрановых путей). Путевые выключатели используются для подачи команд управления в схему в определенных точках пути исполнительных органов (например, при подходе кабины лифта к этажу).

Путевые и конечные выключатели могут быть бесконтактными и контактными. Последние в зависимости от вида привода их контактной системы делятся на вращающиеся, рычажные и нажимные.

Вращающиеся путевые и конечные выключатели имеют привод от валика, соединенного с валом двигателя непосредственно или через редуктор. На валике располагаются кулачковые шайбы, воздействующие на контактную систему выключателя при достижении валиком определенного положения. При вращении вала двигателя в определенном его положении кулачковые шайбы осуществляют переключение контактов выключателя.

Рычажные конечные и путевые выключатели имеют привод своей контактной системы от поворотного рычага, соединенного с движущейся частью ЭП или исполнительного органа. Возврат рычага и контактов в исходное положение осуществляется с помощью пружины.

В нажимном выключателе переключение контактов происходит при нажатии на его шток, возврат которого в исходное положение осуществляется под действием пружины. В качестве нажимных выключателей применяются также микропереключатели, у которых при воздействии на шток происходит переключение упругого контакта.

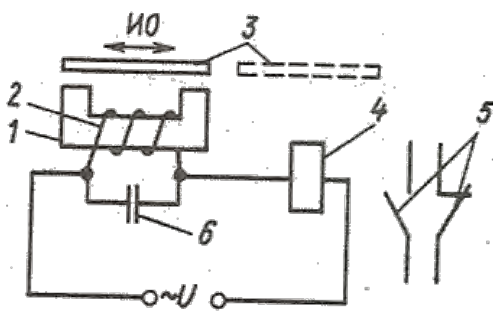


Рис. 6.7. Бесконтактный индукционный датчик положения

Выпускаемые контактные путевые и конечные выключатели серий КУ 700; ВУ 150 и ВУ 250; ВК 200 и ВК 300; ВПК 1000, 2000, 3000 позволяют коммутировать одну или две цепи переменного тока до 10 А и напряжении до 500 В и постоянного тока до 1,5 А при напряжении до 220 В.

Бесконтактный индукционный датчик положения (рис. 6.7) состоит из разомкнутого магнитопровода 7 с катушкой 2, параллельно которой включен конденсатор 6. Катушка с конденсатором в свою очередь включены в цепь переменного тока вместе с обмоткой реле 4. Когда якорь датчика 3, закрепленный на подвижной части ЭП или исполнительного органа рабочей машины, не замыкает магнитопровод 7 (пунктирное изображение), индуктивное сопротивление катушки 2 мало, в ее цепи проходит большой ток и реле 4 включено. Когда якорь 3 переместится и займет положение над магнитопроводом 7, индуктивное сопротивление катушки 2 возрастет и в цепи (за счет подбора емкости конденсатора б) наступит резонанс тока и резкое его снижение. Реле 4 в результате снижения тока отключается, что вызывает переключение его контактов 5 в цепи управления ЭП.

Потенциометрические, сельсинные и цифровые датчики положения применяются главным образом в замкнутых ЭП.

6.3. Виды и аппараты защиты, блокировок и сигнализации в ЭП

Аппараты максимальной токовой защиты. При работе ЭП может произойти замыкание электрических цепей между собой или на землю (корпус). Для защиты ЭП и питающей сети от появляющихся в этих случаях сверхтоков предусмотрена максимальная токовая защита, которая реализуется с помощью плавких предохранителей, реле максимального тока, автоматических выключателей.

Плавкие предохранители FU включаются в каждую фазу сети между выключателем Q напряжения сети и контактами линейного контактора KM.

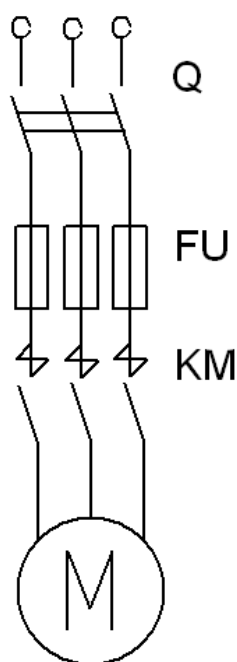


Рис. 6.8. Схема защиты предохранителем АД

Основные элементы предохранителя: плавкая вставка и дугогасительное устройство. Выбор плавкой вставки производится по току, и рассчитывается так, чтобы при пуске двигателей она не перегорала от пускового тока.

Применяются трубчатые без наполнителя ПР2, быстродействующие ПНБ-5, трубчатые разборные с наполнителем ПН2, резьбовые ПРС ($I = 6 - 1000 \text{ A}$).

Реле максимального тока. Катушки этих реле FA1 и FA2 включены в две фазы трехфазных двигателей и в 1 или 2 полюса ДПТ. Размыкающие контакты этих реле включены в цепь катушки KM линейного контактора.

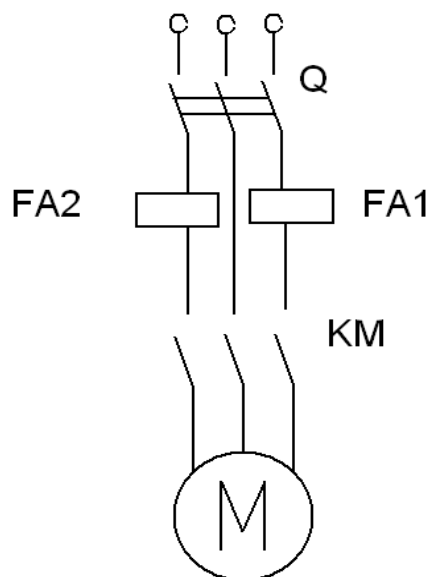


Рис. 6.9. Схема защиты АД с помощью реле максимального тока

Уставка реле максимального тока выбирается так, чтобы двигатель не отключался при пуске и других переходных процессах.

Автоматические воздушные выключатели (автоматы). Обеспечивают ручное включение и отключение двигателей, а также их защиту от токов к.з. и перегрузок (рис.6.10).

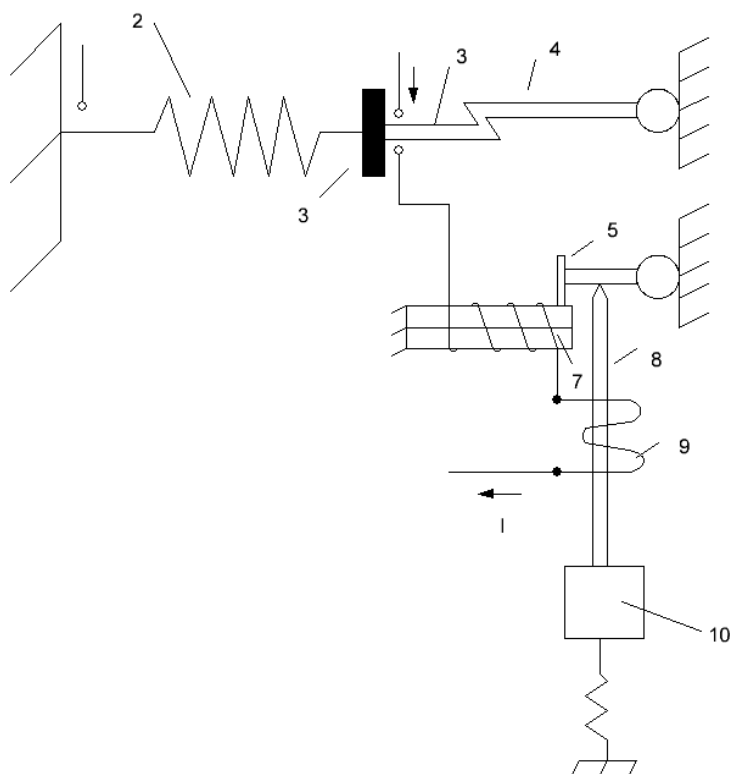


Рис. 6.10. Упрощенное устройство автомата

Автомат имеет: контактную систему, токовое реле, тепловое токовое реле. Контролируемый ток протекает через контакт 1 автомата, нагреватель теплового реле 6, катушку 9 реле максимального тока. При к.з. сердечник 10 реле максимального тока втягивается в катушку 9 и толкателем 8 воздействует на рычаг 5, который приподнимает защелку 4. Освобождается рычаг 3, и под действием пружины 2 контакты 1 АВ размыкаются. Аналогична работа при перегрузках в цепи ($I_n < I < I_{кз}$).

Исполнение: АП50, АК-63, А3700, АЕ2000, ВА
 ($I = 1 \div 10000 \text{ А}$, $t_{откл} = 0,02 \div 0,7 \text{ с}$).

Нулевая защита: при значительном снижении напряжения сети или его исчезновении эта защита обеспечивает отключение ЭД и предотвращает их самопроизвольное включение (самозапуск) после восстановления напряжения.

Если ЭД управляется от кнопок контакторами и магнитными пускателями - нулевая защита осуществляется самими этими аппаратами без применения дополнительных средств.

При управлении ЭП от командоконтроллера нулевая защита осуществляется дополнительным реле напряжения FV, которое включается в нулевом положении контроллера через контакт SMO и становится на самопитание через свой контакт FV. В других положениях контроллера питание всей схемы управления осуществляется через этот контакт (нулевая защита).

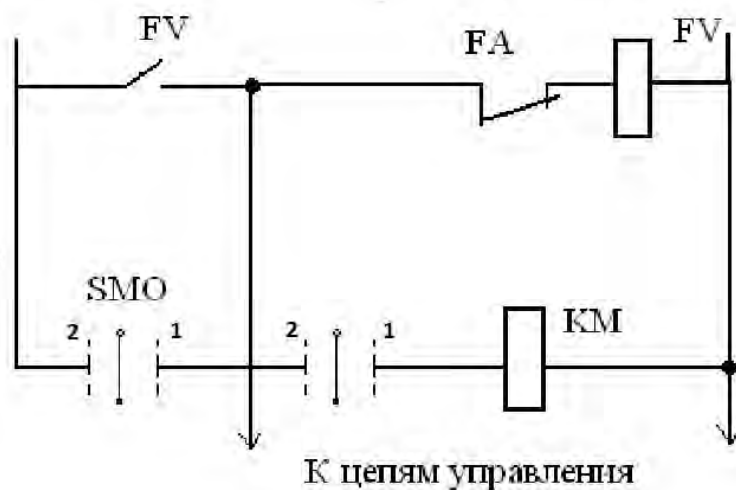


Рис. 6.11. Нулевая защита

Повторное включение после исчезновения и появления напряжения возможно только при переводе контроллера в нулевое положение.

Тепловая защита: Отключение двигателя при $I_n < I < I_{кз}$ (обрыв одной из фаз) осуществляется с помощью тепловых реле максимального тока, автоматов.

Тепловые реле включаются в 2 фазы 3-х фазного АД; в 1 или 2 полюса ДПТ.

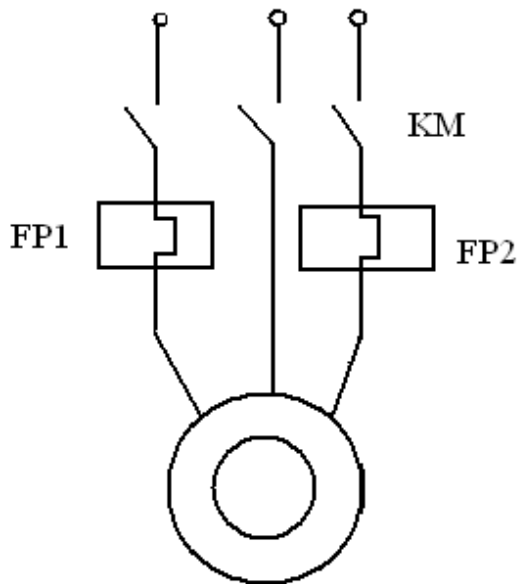


Рис. 6.12. Включение тепловых реле FP в две фазы трехфазных двигателей

Размыкающиеся контакты FP1 и FP2 включаются в цепи катушек линейных контакторов (KM). Действие тепловых реле основано на эффекте изгибания биметаллической пластинки. Номинальный ток теплового элемента реле выбирают из условия:

$$I_{\text{тепл.э}} = (1 \div 1,15) I_{\text{н.двиг}} \quad (6.1)$$

При повторно-кратковременных режимах работы, когда процессы нагрева различны, защиту двигателя от перегрузок осуществляет реле максимального тока

$$I_{\text{уставки}} = (1,2 \div 1,3) I_{\text{ндв}} \quad (6.2)$$

Чтобы реле не срабатывали при пусковых режимах, то на время пуска его контакты шунтируют контактами реле времени.

Минимально-токовая защита: Используется в ЭП с ДПТ и СД для защиты от обрыва их цепей возбуждения. Исчезновение $I_{\text{в}}$ приводит к тому, что двигатель идет в разнос.

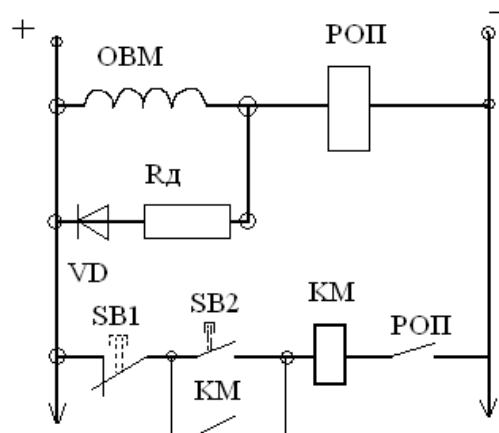


Рис. 6.13. Минимальная токовая защита

Защита осуществляется с помощью реле минимального тока РОП. Включить двигатель можно только при включении РОП (при наличии $I_{\text{в}}$ в ОВМ).

Существуют и *специальные виды защит*: от перенапряжения на ОВ ДПТ; от повышения напряжения в системе УП-Д, от превышения скорости ЭП, нулевая защита и др.

6.4. Защита от перенапряжений на ОВ

При отключении ОВ от напряжения из-за быстрого спадания I_B и F_B возникает большая (несколько кВ) ЭДС самоиндукции, которая может вызвать пробой изоляции ОВ. Защита осуществляется с помощью разрядного резистора R_p и диода VD (рис.6.13).. VD позволяет протекать току только под действием ЭДС самоиндукции, возникающей при отключении R_p снижает темп спадания I_B и ограничивает величину ЭДС самоиндукции.

6.5. Электрические блокировки в системах ЭП

Служат для обеспечения заданной последовательности операций, предотвращающей возникновение нештатных и аварийных ситуаций, неправильных действий со стороны оператора (рис.6.14).

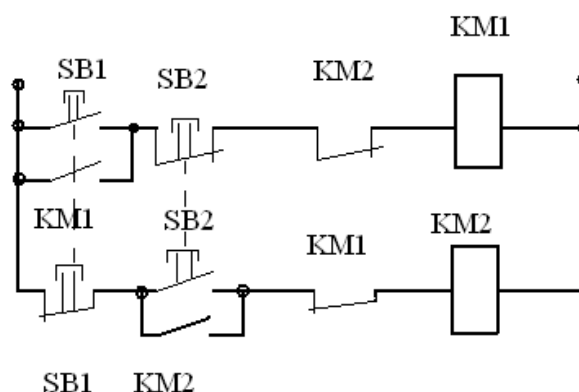


Рис. 6.14. Схема перекрестного включения размыкающих контактов контакторов

1. Электрическая блокировка (не допускает одновременную работу КМ1 и КМ2).
2. Использование двухцепных кнопок управления (нажатие любой из кнопок приводит к замыканию цепи одного из контакторов и размыканию цепи другого).

Используются и другие виды блокировок.

6.6. Сигнализация в схемах управления ЭП

Используется для контроля хода технологического процесса или последовательности выполняемых операций, состояния защиты, наличия напряжения питания или какого-либо электрического сигнала. Может быть световой, звуковой и визуальной (измерительные приборы).

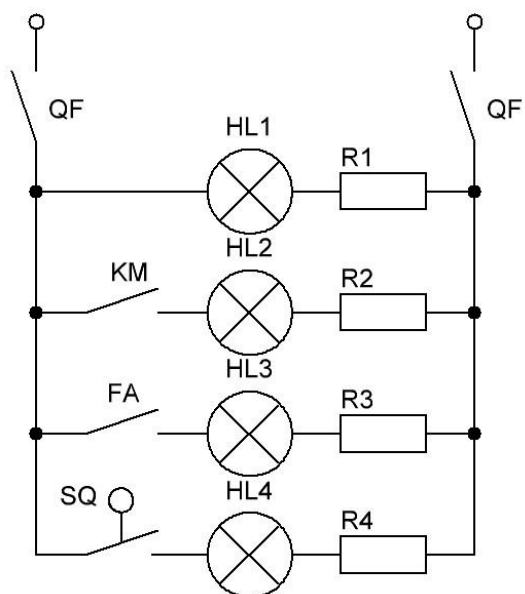


Рис. 6.15. Возможная сигнализация в схеме управления ЭП

- HL1 - о подаче напряжения в схему (включение QF).
- HL2 - о включении контактора KM.
- HL3 - о срабатывании максимальной токовой защиты FA.
- HL4 - о срабатывании конечного выключателя SQ.

Тема 7. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Управление пуском, реверсом и торможением ДПТ в большинстве случаев осуществляется в функциях времени, скорости (ЭДС), тока и пути.

7.1. Типовая схема пуска ДПТ НВ в функции времени

Эта схема (рис.7.1, а) включает в себя кнопки управления *SB1* (пуск) и *SB2* (останов, стоп ДПТ), линейный контактор *KM1*, обеспечивающий подключение двигателя к сети, и контактор ускорения *KM2* для выключения (закорачивания) пускового резистора R_d . В качестве датчика времени в схеме используется электромагнитное реле времени *KT*. При подключении схемы к источнику питания

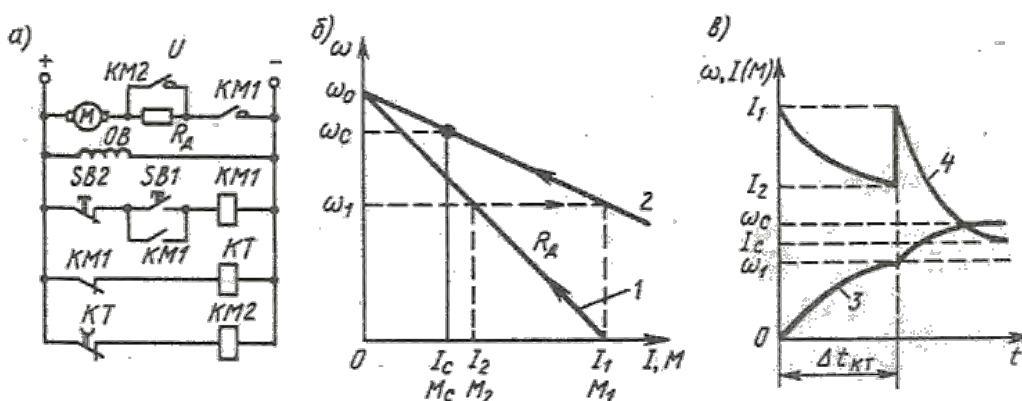


Рис. 7.1. Типовая схема пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в функции времени

происходит возбуждение ДПТ и срабатывает реле *KT*, размыкая свой контакт в цепи катушки контактора *KM2* и подготавливая двигатель к пуску.

При нажатии кнопки *SB1* получает питание контактор *KM1*, который своим главным контактом подключает двигатель к источнику питания. Двигатель начинает разбег с включенным резистором R_d в цепи якоря. Одновременно замыкающий блок-контакт контактора *KM1* шунтирует кнопку *SB1* и она может быть отпущена, а размыкающий блок-контакт *KM1* разрывает цепь питания катушки реле времени *KT*. После прекращения питания катушки реле времени через интервал времени Δt_{km} называемый выдержкой времени, размыкающий контакт *KT* замкнется в цепи катушки контактора *KM2*, последний включится и главным контактом закортит пусковой резистор R_d в цепи якоря. Таким образом, при пуске двигатель в течение времени Δt_{km} разгоняется по искусственной характеристике 1 (см. рис. 7.1, б), а после шунтирования резистора R_d - по естественной характеристике 2. Сопротивление резистора R_d выбирается таким образом, чтобы в момент включения двигателя ток I_1 в цепи и соответственно момент M_1 не превосходили допустимого уровня.

За время Δt_{km} после начала пуска скорость вращения двигателя (кривая 3) достигает значения ω_1 , а ток в цепи якоря (кривая 4) снижается до уровня I_2 (см. рис. 7.1, в). После шунтирования резистора R_d ток в цепи якоря скачком возрастает до значения I_1 не превышающего допустимого уровня. Изменение скорости, тока и момента во времени происходит по экспоненте.

7.2. Типовая схема пуска двигателя постоянного тока в две ступени в функции ЭДС и динамического торможении в функции времени

В этой схеме (рис. 7.2, а) в качестве датчика ЭДС используется якорь двигателя M , к которому подключены катушки контакторов ускорения $KM1$ и $KM2$. С помощью регулировочных резисторов $R_{y1} + R_{y2}$ эти контакторы настраиваются на срабатывание при определенных скоростях двигателя.

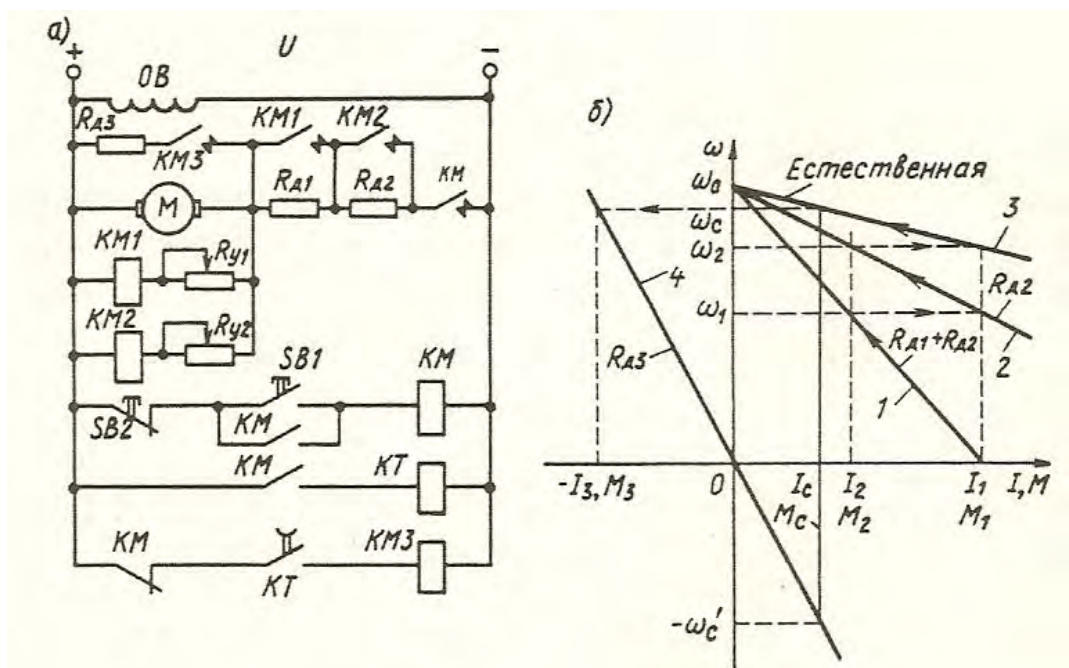


Рис. 7.2. Типовая схема пуска двигателя постоянного тока в две ступени в функции ЭДС и динамического торможении в функции времени

Для осуществления торможения в схеме предусмотрен резистор $R_{\partial 3}$, подключение и отключение которого осуществляется контактором торможения $KM3$. Для обеспечения необходимой при торможении выдержки времени используется электромагнитное реле времени KT , замыкающий контакт которого включен в цепь катушки контактора торможения $KM2$.

После подключения схемы к источнику питания происходит возбуждение ДПТ, при этом все управляющие аппараты схемы остаются в исходном положении. Пуск ДПТ осуществляется нажатием кнопки $SB1$, что приводит к срабатыванию линейного контактора KM , подключению двигателя к источнику питания и началу его разбега с включенными резисторами в цепи якоря $R_{\partial 1} + R_{\partial 2}$ по характеристике 1 (см. рис. 7.2, б). По мере увеличения скорости растет ЭДС двигателя и соответственно напряжение на катушках контакторов $KM1$ и $KM2$. При скорости ω_1 срабатывает контактор $KM1$, закорачивая своим контактом первую ступень пускового резистора $R_{\partial 1}$, и двигатель начинает работать по характеристике 2. При скорости ω_2 срабатывает контактор $KM2$, закорачивая вторую ступень пускового резистора $R_{\partial 2}$. При этом двигатель выходит на работу по естественной характеристике 3 и заканчивает свой разбег в точке установившегося режима, определяемой пересечением естественной характеристики 3 двигателя и характеристики нагруз-

ки ω (M_c).

Для перехода к режиму торможения необходимо нажать кнопку $SB2$. При этом произойдет следующее. Катушка контактора KM потеряет питание, разомкнется замыкающий силовой контакт KM в цепи якоря ДПТ и последний отключится от источника питания. Размыкающий же блок-контакт KM в цепи катушки контактора торможения $KM3$ замкнется, последний сработает и своим главным контактом подключит резистор $R_{\partial 3}$ к якорю M , переводя ДПТ в режим динамического торможения по характеристике 4 (см. рис.72, б). Одновременно разомкнется замыкающий контакт контактора KM в цепи реле времени KT , оно потеряет питание и начнет отсчет выдержки времени. Через интервал времени, соответствующий снижению скорости ДПТ до нуля, реле времени отключится и своим контактом разорвет цепь питания контактора $KM3$. При этом резистор $R_{\partial 3}$ отключается от якоря M двигателя, торможение заканчивается и схема возвращается в свое исходное положение.

7.3. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с АД

Типовые схемы релейно- контакторного управления АД строятся по тем же принципам (t , ω , l , пути), что и схемы с ДПТ.

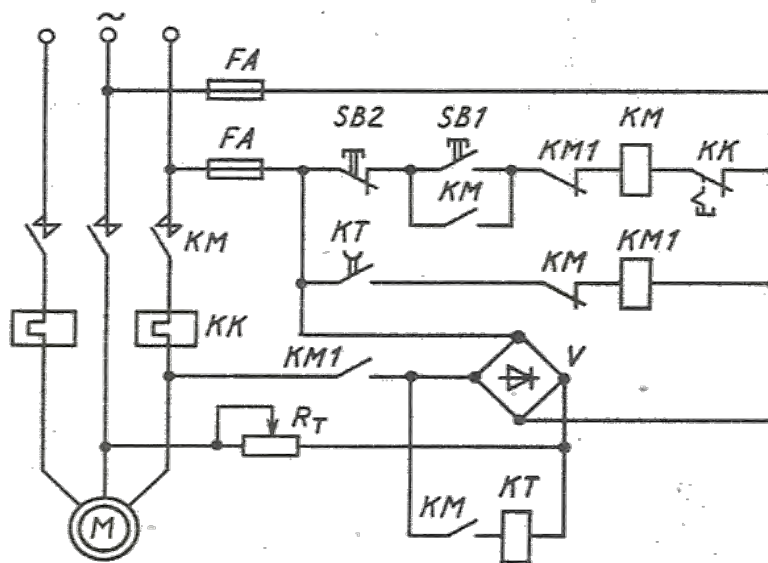


Рис. 7.3. Типовая схема управления асинхронным двигателем

Типовая схема управления асинхронным двигателем, обеспечивающая его прямой пуск и динамическое торможение в функции времени (рис. 7.3). Пуск двигателя в этом случае осуществляется нажатием кнопки $SB1$, после чего срабатывает линейный контактор KM , подключающий двигатель к источнику питания. Одновременное замыкание контакта KM в цепи реле времени KT вызовет срабатывание последнего и замыкание его контакта в цепи контактора торможения $KM1$, который тем не менее не сработает, так как в этой цепи разомкнулся размыкающий контакт KM . Для остановки АД необходимо нажать кнопку $SB3$. Тогда контактор KM отключится и, разомкнув свои контакты в цепи статора, отключит двигатель от сети переменного тока. Одновременно с этим замкнется контакт KM в цепи аппарата $KM1$ и разомкнется контакт KM в цепи реле

КТ, что приведет к включению контактора торможения **КМ1**, подаче в обмотки статора постоянного тока от выпрямителя V через резистор R_r и переводу двигателя в режим динамического торможения.

Реле времени **КТ**, потеряв питание, начнет отсчет выдержки времени. Через некоторый интервал времени, соответствующий времени останова двигателя, реле **КТ** разомкнет свой контакт в цепи контактора **КМ1**, тот отключится и прекратит подачу постоянного тока в цепь статора. Схема вернется в исходное положение.

Интенсивность динамического торможения регулируется резистором R_m , с помощью которого устанавливается необходимый постоянный ток в статоре двигателя.

Для исключения возможности одновременного подключения статора к источникам переменного и постоянного токов в данной схеме используется типовая блокировка с помощью размыкающих контактов **КМ** и **КМ1**, включенных перекрестно в цепи катушек этих аппаратов.

Типовые схемы управления асинхронным двигателем с фазным ротором, которые рассчитываются в основном на среднюю и большую мощности, должны предусматривать ограничение токов при пуске, реверсе и торможении с помощью добавочных резисторов в цепи ротора. В некоторых случаях резисторы в цепь ротора включаются с целью увеличения пускового момента двигателя.

Схема пуска асинхронного двигателя в одну ступень в функции времени и торможения противовключением в функции ЭДС (рис. 7.4) работает следующим образом. После подачи напряжения происходит включение реле времени **КТ**, которое своим размыкающим контактом разрывает цепь питания контактора **КМ3**, предотвращая тем самым его включение и преждевременное закорачивание пусковых резисторов в цепи ротора.

При нажатии кнопки **SB1** включается контактор **КМ 1**, статор подсоединяется к сети, электромагнитный тормоз **УВ** растормаживается и начинается разбег двигателя. Включение контактора **КМ1** одновременно приводит к срабатыванию контактора **КМ4**, который своими контактами шунтирует

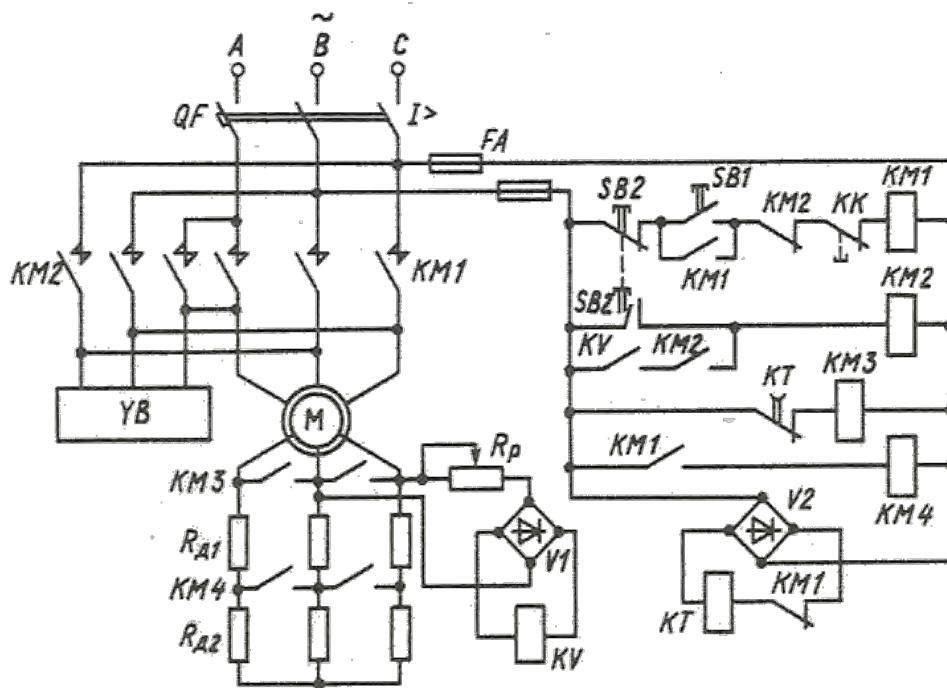


Рис 7.4. Схема пуска асинхронного двигателя в одну ступень в функции времени и торможения противовключением в функции ЭДС

ненужный при пуске резистор противовключения $R_{д2}$, а также разрывает цепь катушки реле времени KT . Последнее, потеряв питание, начинает отсчет выдержки времени, после чего замыкает свой контакт в цепи катушки контактора $KM3$, который, срабатывая, шунтирует пусковой резистор $R_{д1}$ в цепи ротора, и АД выходит на свою естественную характеристику.

Управление торможением в схеме обеспечивает реле торможения KV , контролирующее уровень ЭДС (скорости) ротора. С помощью резистора R_p оно регулируется таким образом, чтобы при пуске ($0 < s < 1$) наводимая в роторе ЭДС была бы недостаточна для включения, а в режиме противовключения ($1 < s < 2$) достаточна.

Для осуществления торможения двигателя необходимо нажать сдвоенную кнопку $SB2$, размыкающий контакт которой, разорвав цепь питания катушки контактора $KM1$, отключит АД от сети, при этом разорвется цепь питания контактора $KM4$ и замкнется цепь питания реле KT т.е. контакторы $KM3$ и $KM4$ отключаются, а в цепь ротора АД вводятся сопротивления $R_{д1}$ и $R_{д2}$.

Нажатие кнопки $SB2$ одновременно приводит к замыканию цепи питания катушки контактора $KM2$, который, включившись, вновь подключает двигатель к сети, но уже с другим чередованием фаз сетевого напряжения на статоре, т.е. АД переходит в режим торможения противовключением. При этом реле KV срабатывает и после отпущения кнопки $SB2$ будет обеспечивать питание контактора $KM2$ через свой и его замыкающие контакты.

В конце торможения, когда скорость будет близка к нулю и ЭДС ротора уменьшится, реле KV отключится и своим размыкающим контактом разорвет цепь питания катушки контактора $KM2$. Последний, потеряв питание, отключит двигатель от сети, и схема придет в исходное положение. При этом тормоз YB , также потеряв питание, обеспечит фиксацию (торможение) вала АД.

Схема пуска асинхронного двигателя в одну ступень в функции тока и динамического торможения в функции скорости (рис. 7.5) включает в себя контакторы **КМ1**, **КМ2** и **КМ3**, реле тока **КА**, реле контроля скорости **SR**, промежуточное реле **KV**, понижающий трансформатор для динамического торможения **T**, выпрямитель **VD**. Максимальная токовая защита осуществляется предохранителями **FA1** и **FA2**, а защита от перегрузки - тепловыми реле **КК1** и **КК2**.

Схема работает следующим образом. После подачи с помощью автоматического выключателя **QF** напряжения для пуска двигателя нажимается кнопка **SB1**, т. е. включается контактор **КМ1**, силовыми контактами которого статор двигателя подключается к сети.

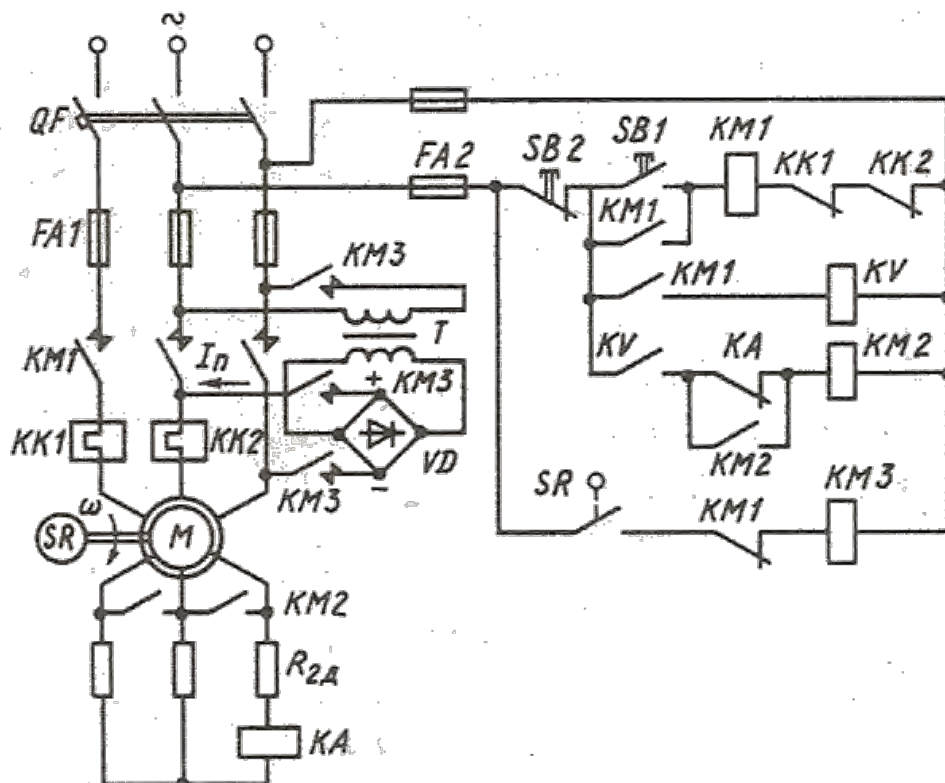


Рис. 7.5. Схема пуска асинхронного двигателя в одну ступень в функции тока и динамического торможения в функции скорости

Бросок тока в цепи ротора вызывает включение реле тока KA и размыкание цепи контактора ускорения $KM2$, т.е. разбег двигателя начнется с пусковым резистором $R_{2д}$ в цепи ротора.

Включение контактора $KM1$ приводит также к шунтированию кнопки $SB1$, размыканию цепи катушки контактора торможения $KM3$ и включению промежуточного реле напряжения KV , что тем не менее не вызывает включения контактора $KM2$, так как до этого в этой цепи разомкнулся контакт реле KA .

По мере увеличения скорости двигателя уменьшаются ЭДС и ток в роторе. При значении тока в роторе, равном току отпущения реле KA , оно отключится и своим размыкающим контактом замкнет цепь питания контактора $KM2$, который, включившись, зашунтирует пусковой резистор $R_{2д}$, после чего АД выйдет на свою естественную характеристику.

Вращение двигателя вызовет замыкание контакта реле скорости SR в цепи контактора $KM3$, однако он не сработает, так как до этого в его цепи разомкнулся контакт контактора $KM1$.

Для перевода двигателя в тормозной режим необходимо нажать кнопку $SB2$. При этом контактор $KM1$ потеряет питание и отключит АД от сети переменного тока. После замыкания контактов контактора $KM1$ включается контактор торможения $KM3$, который, замыкая цепь питания обмотки статора от выпрямителя VD , подключенного к трансформатору T , осуществляет перевод АД в режим динамического торможения. Одновременно потеряют питание аппараты KV и $KM2$, что обеспечит ввод в цепь ротора резистора $R_{2д}$, и двигатель начнет тормозиться.

При скорости двигателя близкой к нулю реле контроля скорости SR разомкнет свой контакт в цепи катушки контактора $KM3$, который отключится и прекратит торможение. Схема вернется в исходное положение и будет готова к последующей работе.

Принцип действия схемы не изменится, если катушку реле тока KA включить в фазу статора, а не ротора.

7.4. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с синхронными двигателями

Релейно-контакторные схемы управления СД, кроме обычных операций включения и отключения двигателя и ограничения пусковых токов, должны обеспечивать его синхронизацию с сетью. Рассмотрим типовые схемы ЭП с СД, обеспечивающие управление возбуждением при синхронизации двигателя с сетью.

Типовая схема управления возбуждением СД в функции скорости (рис. 7.6, а). В этой схеме подключение обмотки возбуждения к источнику питания U_B осуществляется контактором $KM2$, который управляется реле скорости KR . Катушка этого реле связана с частью разрядного резистора R_p через диод VD . При включении контактора $KM1$ (его цепи управления на рисунке не показаны) обмотка статора двигателя подключается к сети переменного тока и образует вращающееся магнитное поле, которое создает момент двигателя, под действием которого он начинает разбег, а также ЭДС в обмотке возбуждения. Под действием этой ЭДС по катушке реле KR начинает протекать выпрямленный ток, оно включается

и размыкает цепь питания контактора $KM2$, т. е. разбег двигателя происходит без тока возбуждения с замкнутой на разрядный резистор R_p обмоткой возбуждения.

По мере роста скорости ротора его ЭДС, а значит, и ток в катушке реле KR снижаются. При подсинхронной скорости ток в катушке реле KR становится

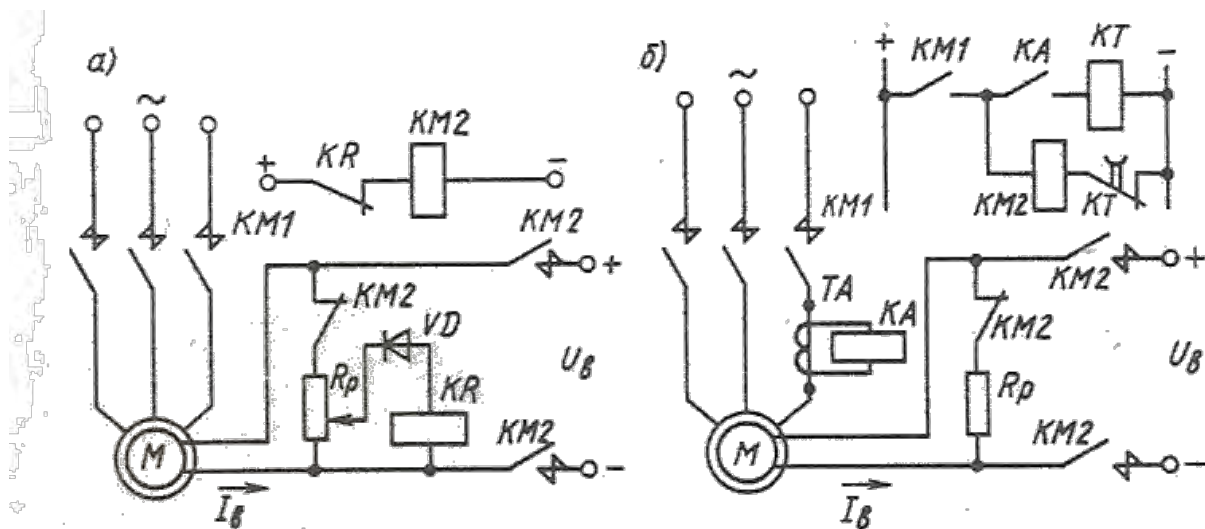


Рис. 7.6. Типовая схема управления возбуждением СД в функции скорости (а), схема управления возбуждением СД в функции тока (б)

меньше тока отпущения, оно отключается и вызывает тем самым включение контактора $KM2$, который подключает обмотку возбуждения к источнику питания, обеспечивая процесс синхронизации СД с сетью.

Схема управления возбуждением СД в функции тока (рис. 7.6,б) включает в себя реле тока KA , обмотка которого питается от трансформатора тока TA , и реле времени KT . При подключении двигателя к сети контактором $KM1$ в цепи обмотки статора возникает бросок пускового тока, который приводит к срабатыванию реле KA . Контакт этого реле, замыкая цепь питания реле времени KT , вызывает отключение контактора возбуждения $KM2$, т. е. разбег двигателя, как и в предыдущем случае, осуществляется с замкнутой на разрядный резистор R_p обмоткой возбуждения.

В конце пуска при подсинхронной скорости двигателя и небольшом токе в статоре реле KA отключается и катушка реле времени KT теряет питание. С определенной выдержкой времени включается контактор $KM2$ и через свои контакты подключает обмотку возбуждения к источнику питания U_B , обеспечивая процесс синхронизации СД с сетью.

Отметим, что в рассмотренных выше схемах после срабатывания контактора возбуждения $KM2$ разрывается цепь разрядного резистора R_p , что облегчает тепловой режим его работы и повышает экономичность схемы.

7.5. Выбор аппаратов коммутации, управления и защиты

Основой для выбора аппаратов коммутации, управления и защиты ЭП являются номинальные (паспортные) данные двигателя, режимы и условия его работы. Применяемые устройства должны полностью обеспечивать выполнение всех возлагаемых на них функций и соответствовать условиям работы ЭП.

Автоматические выключатели выбираются по номинальному току и напряжению, роду тока, предельной коммутационной способности, электродинамической и термической стойкости, собственному времени включения. Все их параметры должны соответствовать работе ЭП как в обычном, так и аварийном режимах, а конструктивное исполнение - условиям размещения.

При наличии в автоматах тепловой и максимальной защит, обеспечиваемых с помощью различного рода расцепителей, их уставки должны соответствовать уровням соответствующих токов двигателя. Максимальная токовая защита не должна срабатывать при пуске двигателя, для чего ее уставку $I_{у.м}$ необходимо выбрать из соотношения

$$I_{у.м} \geq k_n I_{пуск} , \quad (7.1)$$

где $I_{пуск}$ - пусковой ток двигателя; $k_n = 1,5 \dots 2,2$ - коэффициент, учитывающий вид расцепителя и возможный разброс тока его срабатывания относительно уставки.

Защита от перегрузки (тепловая защита) считается эффективной при следующем соотношении тока ее уставки и номинального тока двигателя:

$$I_{у.т} = (1,2 \dots 1,4) I_{ном}. \quad (7.2)$$

Предельной коммутационной способностью автомата считают максимальное значение тока короткого замыкания, который он способен отключить несколько раз, оставаясь исправным.

Электродинамическая стойкость автомата определяется амплитудой ударного тока короткого замыкания, которую он способен выдержать без повреждения.

Термическая стойкость автомата определяется максимально допустимым количеством тепла, которое он может выдержать без повреждения за время действия тока короткого замыкания.

Для определения соответствия приведенных параметров автоматов условиям работы ЭП предварительно определяются токи короткого замыкания.

Электромагнитные аппараты (контакторы, реле, магнитные пускатели). К числу показателей, по которым они выбираются, относятся характер и значения напряжений главной цепи и цепи управления (включающих катушек); коммутационная способность контактов и их число, допустимая частота включений; режим работы; категория размещения; степень необходимой защиты от воздействия окружающей среды.

Дополнительно при выборе реле, выполняющих функции управления и защиты, учитываются род входной воздействующей величины (ток, напряжение, мощность), выдержка времени (реле времени), коэффициент возврата, время срабатывания и отпускания.

Выключатели и переключатели выбираются по роду и значению напряжения, току нагрузки, числу переключений, которое они допускают по условиям механической и электрической износостойкости, а также конструктивному исполнению.

Кнопки и ключи управления выбираются по роду и уровню напряжения, значению коммутируемого тока, числу коммутируемых цепей, требуемой степени защиты, климатическим условиям, электрической и механической

износостойкости.

Предохранители. Выбор плавкой вставки предохранителя определяется пусковым током двигателя, т. е. она не должна перегорать при его пуске. Для АД с короткозамкнутым ротором ток плавкой вставки при времени пуска до 5 с

$$I_{п.в} = I_{пуск} / 2,5, \quad (7.3)$$

а при времени пуска большем 5 с

$$I_{п.в} = I_{пуск} / (1,6 \dots 2). \quad (7.4)$$

Для АД с фазным ротором и ДПТ обычного исполнения ток плавкой вставки рассчитывается по отношению к номинальному току:

$$I_{п.в} \geq (1 \dots 1,25) I_{ном}. \quad (7.5)$$

Для защиты цепей управления ток плавкой вставки выбирается из условия

$$I_{п.в} = 2,5 I_c, \quad (7.6)$$

где I_c - суммарный ток катушек максимального числа одновременно включенных аппаратов в схеме управления.

Реле максимального тока. Уставка тока при защите АД с короткозамкнутым ротором выбирается в соответствии с соотношением:

$$I_{у.т} = (1,2 \dots 1,3) I_{пуск}, \quad (7.7)$$

а для АД с фазным ротором и ДПТ

$$I_{у.т} = (2 \dots 2,5) I_{ном}. \quad (7.8)$$

Тема 8. ЗАМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Замкнутые схемы применяются в тех случаях, когда требуется обеспечить управление движением исполнительных органов рабочих машин с высокими качеством (большие диапазон регулирования скорости и точность ее поддержания, заданное качество переходных процессов и необходимая точность остановки, а также высокая экономичность или оптимальное функционирование технологического оборудования и самого ЭП).

8.1. Схемы замкнутых структур электропривода

Замкнутые структуры ЭП строятся по принципу компенсации внешних возмущений и принципу отклонения, называемому также принципом обратной связи.

Принцип компенсации рассмотрим на примере компенсации наиболее характерного внешнего возмущения ЭП - момента нагрузки M_c при регулировании его скорости ω (рис. 8.1, а). Основным признаком такой замкнутой структуры ЭП является наличие цепи, по которой на вход ЭП вместе с задающим сигналом скорости U_{zc} подается сигнал, пропорциональный моменту нагрузки: $U_m = k_m M_c$, где k_m - коэффициент пропорциональности. В результате управление ЭП осуществляется суммарным сигналом U_Δ , который, автоматически изменяясь при колебаниях момента нагрузки, обеспечивает поддержание скорости ЭП на заданном уровне.

Несмотря на эффективность, управление ЭП по схеме, приведенной на рис. 8.1, осуществляется редко из-за отсутствия простых и надежных датчиков момента нагрузки M_c (возмущающего воздействия). Поэтому в большинстве замкнутых схем используется **принцип отклонения (принцип обратной связи)**, который характеризуется наличием цепи обратной связи, соединяющей выход ЭП с его входом. В данном случае при регулировании скорости используется цепь обратной связи, по которой информация о текущем значении скорости (сигнал обратной связи $U_{oc} = k_{oc} \omega$) подается на вход ЭП, где он вычитается из сигнала задания скорости U_{zc} . Управление осуществляется сигналом отклонения $U_\Delta = U_{zc} - U_{oc}$ (его также называют сигналом рассогласования или ошибки), который при отклонении скорости от заданной соответственно автоматически изменяется и с помощью системы управления ЭП устраняет эти отклонения.

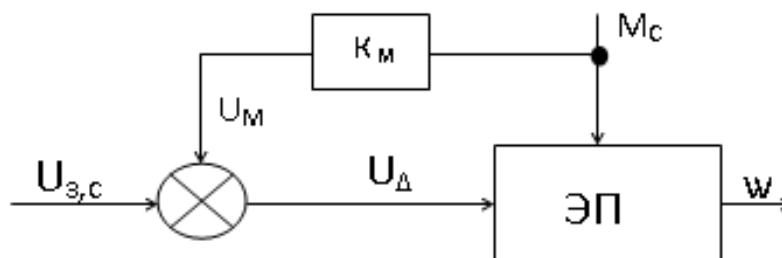


Рис. 8.1. Схема управления ЭП

При необходимости регулирования других координат ЭП или рабочей машины используются обратные связи по этим координатам.

Все применяемые в замкнутом ЭП обратные связи делятся на поло-

жительные и отрицательные, линейные и нелинейные, жесткие и гибкие. **Положительной** называется такая обратная связь, сигнал которой направлен согласно (т.е. складывается) с задающим сигналом, сигнал же **отрицательной** связи направлен ему встречно.

Жесткая обратная связь действует как в установившемся, так и переходном режимах ЭП. Сигнал **гибкой** обратной связи вырабатывается только в переходных режимах ЭП и служит для обеспечения требуемого их качества, например устойчивости движения, допустимого перерегулирования и др.

Для **линейной** обратной связи характерна пропорциональная зависимость между регулируемой координатой и сигналом обратной связи U_{oc} , при реализации же **нелинейной** связи эта зависимость нелинейна.

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

Для обеспечения заданных хода и качества технологических процессов на ЭП кроме указанных «внутренних» обратных связей часто подаются сигналы различных технологических датчиков, например температуры, натяжения, усилия резания, давления, расхода и др. В этом случае ЭП вместе с рабочей машиной или механизмом, реализующим технологический процесс или операцию, образуют систему автоматического регулирования (рис. 8.2). В этой системе ЭП является силовым регулирующим устройством, выходная координата которого $X_{вых}$ (например, скорость) является управляющим воздействием для рабочей машины **РМ** и обеспечивает заданный ход технологического процесса при изменениях как его задающего сигнала $X_{зм}$, так и возмущающего воздействия $X_{возм2}$. Сигналом задания для ЭП в этом случае является сигнал отклонения (рассогласования) между задающим сигналом технологического параметра $X_{зм}$ и сигналом технологической обратной связи $X_{т.ос}$. Отметим, что сигналов технологических обратных связей может быть несколько, а для выработки задающего сигнала для ЭП используются ЭВМ или микропроцессоры.

Как уже отмечалось, для управления движением исполнительного органа иногда требуется регулировать несколько координат ЭП, например ток (момент) и скорость. В этом случае замкнутые ЭП выполняются по одной из следующих структурных схем.

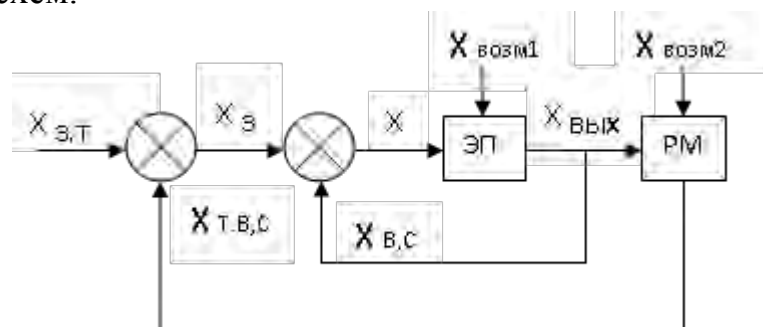


Рис. 8.2. Система автоматического регулирования

Схема ЭП с общим усилителем (рис. 8.3). На схеме электродвигатель представлен для удобства анализа в виде двух частей - электрической ЭЧД и

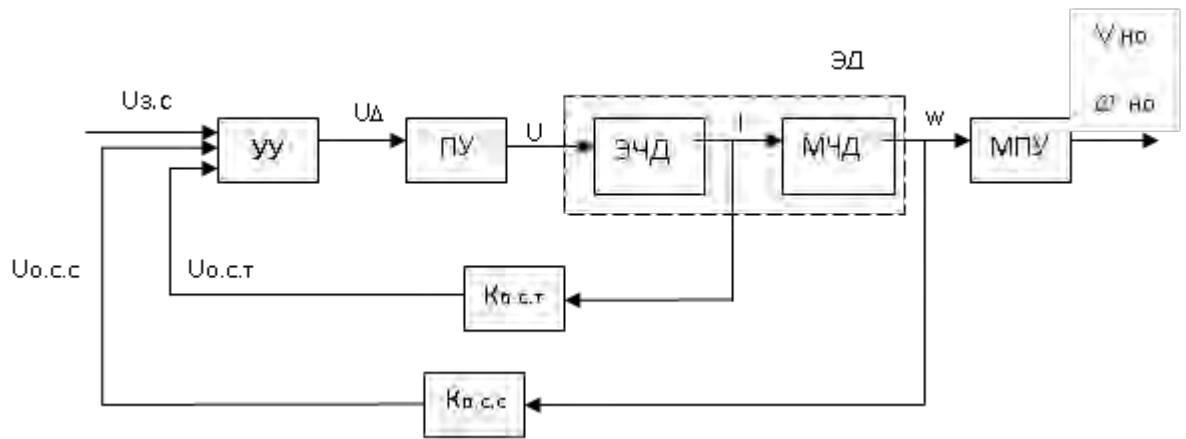


Рис. 8.3. Схема ЭП с общим усилителем

механической МЧД. Схема обеспечивает регулирование двух координат ЭП - скорости и тока (момента). В этой схеме сигналы обратных связей по току $U_{ост}$ и скорости $U_{осс}$ подаются на вход управляющего устройства **УУ** вместе с задающим сигналом скорости $U_{зс}$, где алгебраически суммируются. Схема отличается простотой реализации, но не позволяет регулировать координаты ЭП независимо друг от друга. За счет использования нелинейных обратных связей, называемых в теории ЭП отсечками, удастся в некотором диапазоне осуществлять их независимое регулирование, что частично устраняет указанный недостаток.

Схема с подчиненным регулированием координат (рис. 8.4) принципиально отличается от предыдущей. В ней регулирование каждой координаты осуществляется собственными регуляторами (тока **РТ**, скорости **РС**), которые вместе с соответствующими обратными связями образуют замкнутые контуры. Эти контуры располагаются таким образом, чтобы входным (задающим) сигналом для контура тока $U_{зт}$ являлся выходной сигнал внешнего по отношению к нему контура скорости. Таким образом, внутренний контур тока будет подчинен внешнему контуру скорости - основной регулируемой координате ЭП.

Основное достоинство такой схемы заключается в возможности оптимальной настройки регулирования каждой координаты, в силу чего она нашла широкое применение в ЭП. Кроме того, подчинение контура тока контуру скорости позволяет упростить процесс ограничения тока и момента, для чего необходимо лишь поддерживать на соответствующем уровне сигнал на выходе регулятора скорости (сигнал задания уровня тока).

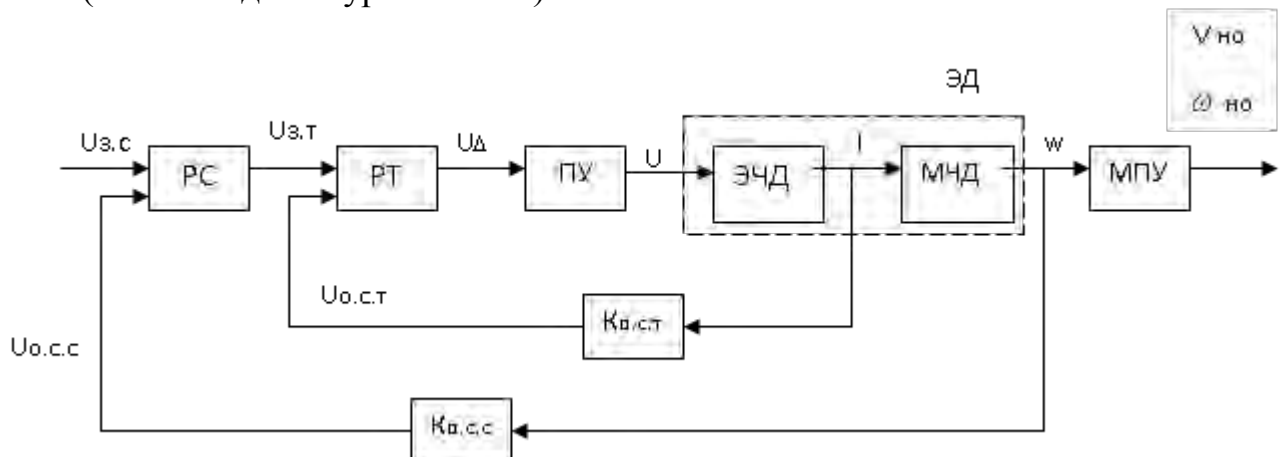


Рис. 8.4. Схема с подчиненным регулированием координат

Для регулирования положения вала двигателя в схемы, приведенные на рис. 8.3 и 8.4, необходимо ввести соответствующую обратную связь.

Рассмотренные схемы отражают структуру управления отдельно взятой рабочей машины. Многие же реальные технологические процессы предусматривают объединение в единый комплекс нескольких взаимодействующих рабочих машин и механизмов. Такие технологические комплексы автоматизируются, и ЭП при этом выполняет основную функцию. За счет соответствующего управления им обеспечивается требуемая последовательность всех технологических операций, достигаются оптимальные режимы работы промышленного оборудования и самого ЭП, осуществляются необходимые блокировки и защиты.

Для управления технологическими комплексами широко используются ЭВМ. Они позволяют быстро проводить обработку большого объема информации о ходе технологического процесса, вырабатывать управляющие воздействия на ЭП рабочих машин и механизмов в соответствии с заданной программой. Особенно широкие возможности открываются при использовании микропроцессорной техники управления, позволяющей осуществлять автоматизацию как сложных технологических процессов в целом, так и отдельных производственных операций и циклов.

8.2. Технические средства замкнутых схем управления электропривода

Современные замкнутые системы управления ЭП реализуются, как правило, на основе полупроводниковых элементов и устройств, отличающихся при правильном их выборе и использовании широкими функциональными возможностями управления, автоматизации и диагностики, надежностью в эксплуатации, высоким КПД и относительно невысокой стоимостью. В то же время подключение элементов ЭП к источникам питания, некоторые виды защит и сигнализации осуществляются в этих системах с помощью рассмотренных выше электрических аппаратов с ручным и электромагнитным управлением.

Силовая часть замкнутых ЭП реализуется на основе того или иного преобразователя - выпрямителя, инвертора, преобразователя частоты, регулятора напряжения постоянного или переменного тока. В этих преобразователях используются диоды, тиристоры, транзисторы и различные модули (интегрированные устройства) на их основе.

Диоды (неуправляемые вентили) применяются в схемах неуправляемых выпрямителей и выпускаются на токи до нескольких килоампер и напряжения до нескольких киловольт. Выпускаются также и диодные модули, представляющие собой соединенные в одном корпусе по определенной схеме два или более диода.

Тиристоры (управляемые диоды) используются во всех видах преобразователей. Применение находят также диодные тиристоры (динисторы), включаемые импульсом прямого напряжения, симметричные тиристоры или симмисторы (англ. TRIAC), эквивалентные двум встречно-параллельно включенным тиристорам, оптотиристоры, управляемые световым потоком, быстродействующие высокочастотные тиристоры и др. Наряду с этими неуправляемыми тиристорами, которые закрываются после снятия управляющего сигнала только при изменении полярности напряжения на аноде, в преобразователях находят применение

и полностью управляемые (запираемые) тиристоры, обозначаемые в технической литературе как GTO. Выключение (закрытие) таких тиристоров производится подачей на их управляющий электрод импульса отрицательного тока управления.

Мощные тиристоры рассчитаны на рабочие токи до нескольких килоампер и напряжения до нескольких киловольт. Выпускаются также тиристорные и тиристорно-диодные модули в различном исполнении, которые могут содержать дополнительные встроенные элементы, обеспечивающие управление и защиту силовых элементов. Такие модули иногда называют «интеллектуальными силовыми модулями».

Транзисторы являются полностью управляемыми приборами и по своим техническим характеристикам делятся на биполярные, биполярные с изолированным затвором (англ. IGBT), полевые (англ. MOSFET) и полевые со статической индукцией (англ. SIT). Наибольшее распространение в силовых транзисторных преобразователях получили транзисторы типа IGBT, сочетающие в себе положительные свойства биполярного (низкие потери мощности во включенном состоянии) и полевого (высокое входное сопротивление) транзисторов.

Силовые транзисторы выпускаются в виде модулей, соответствующих типовым схемам различных преобразователей. Современное их исполнение предусматривает и наличие встроенных дополнительных элементов, осуществляющих функции управления, защиты, диагностики и связи с другими элементами схем.

Для выработки законов управления двигателем, который реализуется силовым преобразователем, замкнутые схемы ЭП содержат определенный набор управляющих элементов: задающие (программные) устройства, определяющие уровень и характер изменения регулируемой координаты; датчик регулируемых координат и технологических параметров, дающие информацию о ходе технологического процесса и работе самого ЭП; регуляторы и функциональные преобразователи, вырабатывающие управляющее воздействие на основе сигналов задающих устройств и датчиков координат и параметров; согласующие элементы, позволяющие соединить в единую схему все указанные элементы за счет согласования их входных и выходных сигналов по роду тока, уровням и виду сигналов и др.

Техническая реализация управляющих устройств современного ЭП весьма разнообразна. Они различаются по своей элементной базе, роду тока, мощности, конструктивному исполнению и многим другим признакам. По характеру преобразования сигналов устройства управления подразделяются на аналоговые и дискретные.

Аналоговые устройства и элементы характеризуются наличием функциональной (линейной или нелинейной) зависимости между входным и выходным сигналами, при этом выходной сигнал может принимать любое значение. Примером силовых аналоговых устройств могут служить управляемые выпрямители и преобразователи частоты, у которых напряжение и частота на выходе могут регулироваться в широких пределах в зависимости от уровня входного управляющего сигнала.

Дискретные элементы и устройства могут иметь только нулевой или максимальный выходной сигнал, который появляется или исчезает при достижении входным сигналом определенного значения. Примерами дискретных элементов могут служить реле и бесконтактные логические элементы. На основе дискретных

элементов создаются цифровые схемы управления ЭП.

Все рассмотренные выше силовые и управляющие устройства находят применение в автоматизированных ЭП. Максимальный технический и экономический эффект достигается использованием в одном ЭП различных элементов.

До относительно недавнего времени задающие, регулирующие, согласующие и функциональные устройства, а также датчики координат ЭП выпускались отдельными сериями, «россыпью», что затрудняло проектирование схем управления, их наладку и эксплуатацию. Прогрессивным явлением в создании технических средств управления стала разработка унифицированной блочной системы регулирования (УБСР). Использование этой системы обеспечивает широкую унификацию производства комплектных средств управления, упрощает проектирование, наладку и эксплуатацию ЭП, улучшает их технико-экономические показатели.

Система УБСР может быть аналоговой, выполняемой на обычных элементах электроники (УБСР-А) и интегральных микросхемах (УБСР-АИ), и дискретной (цифровой), состоящей из обычных элементов (УБСР-Д) и микросхем (УБСР-ДИ).

Важной характеристикой схем управления ЭП является наличие или отсутствие в них возможности изменения (перенастройки) алгоритма функционирования. По этому признаку они подразделяются на схемы с жестким (неизменным) алгоритмом и схемы с изменяемым (программируемым) алгоритмом.

В схемах с жестким алгоритмом преобразование сигналов осуществляется в соответствии со схемой соединения и характеристиками элементов. Для изменения алгоритма функционирования такой схемы необходима замена (перемонтаж) соответствующих элементов.

Схемы с программируемым алгоритмом позволяют менять управление за счет изменения программы, управляющей работой аппаратной части этих устройств. Реализация таких устройств осуществляется с использованием средств компьютерной (микропроцессорной) техники управления и характеризует собой одну из важнейших тенденций развития современных ЭП.

8.3. Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями постоянного тока

Характеристики разомкнутых ЭП, построенных по системе «преобразователь-двигатель» (П - Д), имеют относительно невысокую жесткость из-за влияния внутреннего сопротивления преобразователя. Для получения значительных диапазонов и высокой точности регулирования скорости требуются более жесткие характеристики, которые возможно обеспечить лишь в замкнутой системе П - Д. Кроме того, характеристики разомкнутой системы не обеспечивают точного регулирования (или ограничения) тока и момента, что также требует перехода к замкнутой системе П - Д. Рассмотрим принципы построения и действия замкнутых схем регулирования скорости, тока, момента и положения двигателя с использованием различных обратных связей.

Замкнутая система П - Д с отрицательной обратной связью по скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Основу такой систе-

мы (рис. 8.5, а) составляет разомкнутая схема П - Д. На валу ДПТНВ находится датчик скорости - тахогенератор $TГ$, выходное напряжение которого $U_{TГ} = \gamma\omega$ пропорционально скорости ДПТ и является сигналом обратной связи. Коэффициент пропорциональности γ называется коэффициентом обратной связи по скорости и может регулироваться за счет изменения тока возбуждения тахогенератора $I_{вTГ}$.

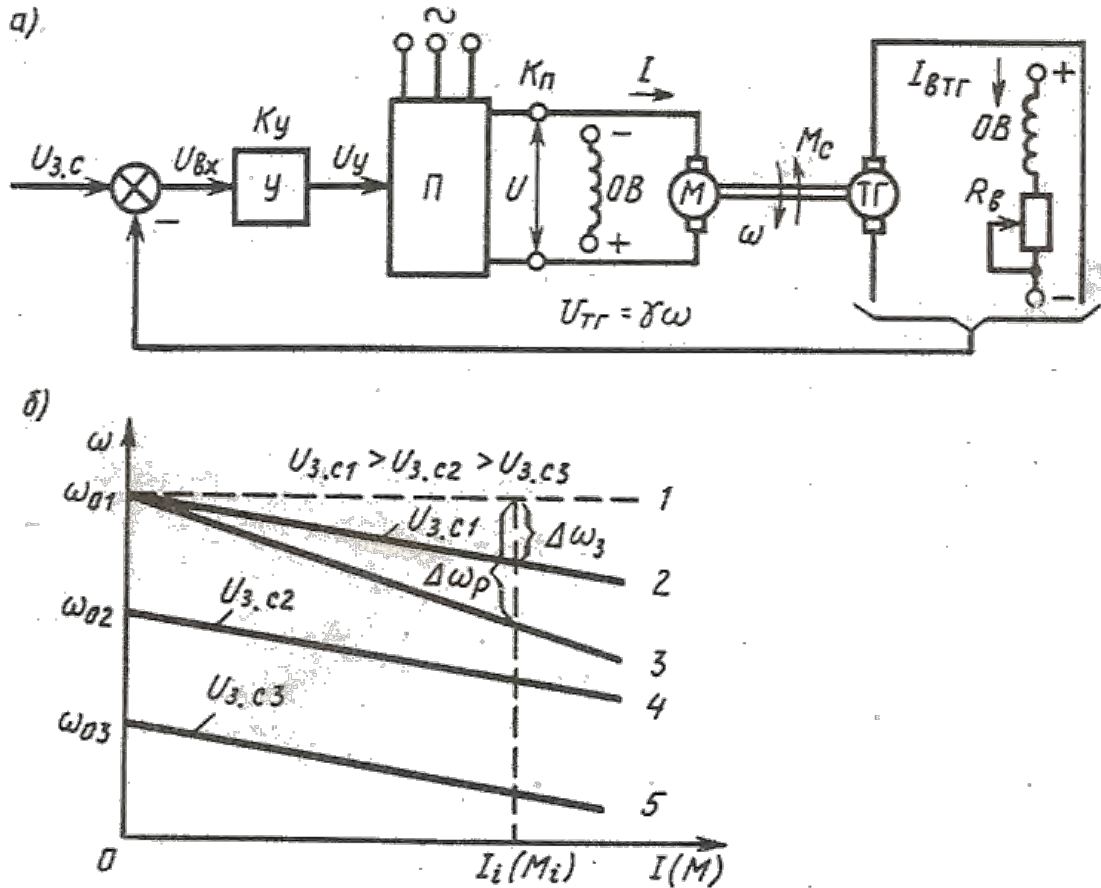


Рис. 8.5. Замкнутая система П-Д с отрицательной обратной связью по скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения и ее характеристики

Сигнал обратной связи $U_{TГ} = \gamma\omega = U_{oc}$ сравнивается с задающим сигналом скорости $U_{з.с}$, и их разность в виде сигнала рассогласования (ошибки) $U_{вх}$ подается на вход дополнительного усилителя Y , который с коэффициентом K_y усиливает сигнал рассогласования $U_{вх}$ и подает его в виде сигнала управления U_y на вход преобразователя Π .

Для получения характеристик ДПТ в замкнутой системе воспользуемся следующими соотношениями (см. рис. 8.5 а):

$$U_{вх} = U_{з.с} - \gamma\omega, \quad (8.1)$$

$$U_y = K_y U_{вх}, \quad (8.2)$$

$$E_\Pi = K_\Pi U_y, \quad (8.3)$$

где E_n и κ_n - соответственно ЭДС и коэффициент усиления преобразователя.

Заменяя в уравнениях электромеханической и механической характеристик ДПТ последовательно E_n на выражение (8.3), далее U_y на выражение (8.2) и затем $U_{вх}$ на выражение (8.1), получим следующие уравнения для этих характеристик ДПТ в замкнутой системе:

$$\omega = \frac{\kappa_y \kappa_n U_{з.с}}{c(1 + \kappa_c)} - \frac{l(R_a + R_n)}{c(1 + \kappa_c)} = \omega_0 - \Delta\omega; \quad (8.4)$$

$$\omega = \frac{\kappa_y \kappa_n U_{з.с}}{c(1 + \kappa_c)} - \frac{M(R_a + R_n)}{c^2(1 + \kappa_c)} = \omega_0 - \Delta\omega; \quad (8.5)$$

где $c = k\Phi_{ном}$; $\kappa_c = \gamma\kappa_y\kappa_n / c$ - общий коэффициент усиления системы П - Д.

Для анализа жесткости полученных характеристик сопоставим перепады скорости в разомкнутой $\Delta\omega_p$ и замкнутой $\Delta\omega_3$ системах при одном и том же токе или моменте:

$$\Delta\omega_p = l(R_a + R_n) / c; \quad (8.6)$$

$$\Delta\omega_3 = l(R_a + R_n) / c(1 + \kappa_c) = \Delta\omega_p(1 + \kappa_c). \quad (8.7)$$

Так как $\kappa_c > 0$, то $\Delta\omega_3 < \Delta\omega_p$, т.е. всегда жесткость характеристик в замкнутой системе больше жесткости характеристик в разомкнутой системе. Сами характеристики, показанные на рис. 8.5, б, представляют собой прямые параллельные линии **2, 4 и 5**, расположение которых определяется уровнем задающего сигнала по скорости $U_{з.с}$ и соответственно скоростью холостого хода ω_0 . Здесь же для сравнения приведена более мягкая характеристика ДПТ в разомкнутой системе (прямая 3).

Для нахождения предельной по жесткости характеристики будем увеличивать коэффициент усиления системы κ_c до бесконечности. Из (8.7) видно, что при $\kappa_c \rightarrow \infty$ $\Delta\omega_3 \rightarrow 0$, т.е. в пределе в данной замкнутой системе может быть получена абсолютно жесткая характеристика (штриховая прямая 1).

Рассмотрим физическую сторону процесса регулирования скорости в данной системе. Предположим, что ДПТ работает под нагрузкой в установившемся режиме и по каким-то причинам увеличился момент нагрузки M_c . Так как развиваемый ДПТ момент становится меньше момента нагрузки, его скорость начинает снижаться и соответственно будет снижаться сигнал обратной связи по скорости $U_{ПГ} = \gamma\omega$, что в свою очередь согласно (8.1)...(8.3) вызовет увеличение сигналов рассогласования $U_{вх}$ и управления U_y и приведет к повышению ЭДС преобразователя, а следовательно, напряжения и скорости ДПТ. При уменьшении момента нагрузки обратная связь будет действовать в другом направлении, приводя к снижению ЭДС преобразователя.

Таким образом, благодаря наличию обратной связи осуществляется автоматическое регулирование ЭДС преобразователя, а значит, и подводимого к ДПТ напряжения, за счет чего повышается жесткость характеристик ЭП. В разомкнутой же системе при изменении момента нагрузки ЭДС преобразователя не изменяется, в результате чего жесткость характеристик электропривода меньше.

Для повышения жесткости характеристик в системе П - Д кроме обратной связи по скорости используются также отрицательная обратная связь по напряжению и положительная обратная связь по току двигателя и их сочетания.

Регулирование (ограничение) тока и момента двигателя постоянного тока с помощью нелинейной отрицательной обратной связи по току (рис. 8.6, а). В качестве датчика тока в этой системе ЭП используется шунт с сопротивлением $R_{ш}$, падение напряжения на котором пропорционально току якоря I . В результате сигнал обратной связи по току

$$U_{o.m} = \beta I,$$

где β - коэффициент связи по току, Ом.

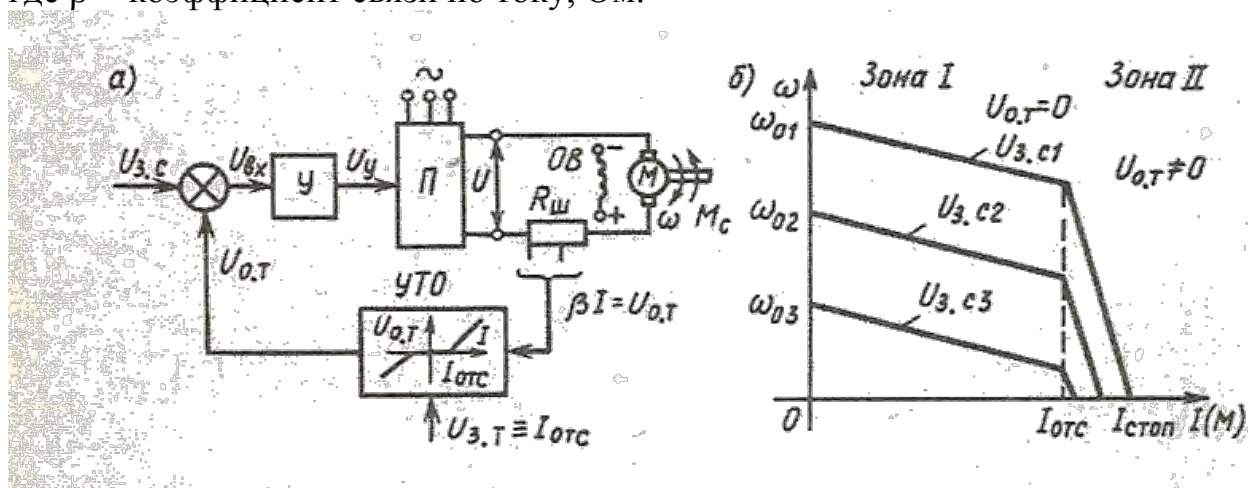


Рис. 8.6. Регулирование (ограничение) тока и момента двигателя постоянного тока с помощью нелинейной отрицательной обратной связи по току и соответствующие характеристики

Отметим, что в качестве резистора $R_{ш}$ часто используется обмотка дополнительных полюсов или компенсационная обмотка двигателя. Сигнал обратной связи $U_{o.m}$ поступает на узел токоограничения **УТО**, называемый также узлом токовой отсечки, вместе с сигналом задания тока $U_{z.m}$, определяющим уровень тока отсечки I_{omc} , с которого начинается регулирование (ограничение) тока.

Работа **УТО** в соответствии с его характеристикой $U_{o.m}(I)$ (см. рис. 8.6, а) происходит следующим образом. При токе в якоре меньше заданного тока отсечки, т.е. пока $I < I_{omc}$, сигнал обратной связи на выходе **УТО** равен нулю. Другими словами, ЭП в диапазоне тока якоря от 0 до I_{omc} является разомкнутым и имеет характеристики, изображенные на рис. 8.6, б в зоне I. При $I > I_{omc}$ на выходе **УТО** появляется сигнал отрицательной обратной связи $U_{o.t} = \beta I$, ЭП становится замкнутым и начинает работать в соответствии с характеристиками в зоне II. Для пояснения вида характеристик ЭП в этой зоне запишем выражение для сигнала рассогласования:

$$U_{ex} = U_{z.c} - \beta I \quad (8.8)$$

Из (8.8) видно, что при увеличении тока I сигнал U_{ex} уменьшается, что в соответствии с (8.2) и (8.3) вызывает уменьшение сигналов U_y и E_p . При этом уменьшается напряжение на двигателе U и соответственно снижается ток в якоре двигателя. Характеристики двигателя становятся крутопадающими (мягкими), что и отражает эффект регулирования (ограничения) тока и соответственно момента. При увеличении коэффициента усиления системы характеристики в зоне II все

ближе приближаются к вертикальным линиям. Уровень ограничения тока определяется задающим сигналом (уставкой) $U_{з.т}$. Ток при нулевой скорости двигателя называется током стопорения $I_{стоп}$.

Замкнутая схема электрического привода с двигателями постоянного тока с обратными связями по скорости и току. Для получения жестких характеристик ЭП, необходимых для регулирования скорости, и мягких характеристик, требуемых для ограничения тока и момента, т. е. при регулировании двух координат, применяются соответствующие обратные связи. В схеме ЭП с нелинейными обратными связями по скорости и току (рис. 8.7, а) для обеспечения нелинейности цепей обратных связей используются узел токоограничения **УТО** и узел ограничения скорости **УСО**, характеристики которых показаны внутри соответствующих условных изображений. Приведенная схема соответствует схеме с общим усилителем и нелинейными обратными связями (см. рис. 8.3), которые определяют разделение области механических характеристик (см. рис. 8.7, б) на три зоны - I, II и III.

В зоне I в диапазоне токов от 0 до $I_{отс}$ действует только обратная связь по скорости, обеспечивая жесткие характеристики ЭП. В зоне II при $I > I_{отс}$ вступает в действие обратная связь по току и характеристики становятся мягче. При дальнейшем увеличении тока и падении скорости ниже скорости отсечки $\omega_{отс}$ перестает действовать обратная связь по скорости, а за счет действия связи по току характеристики становятся еще мягче (зона III), т. е. обеспечивается требуемое ограничение тока и момента.

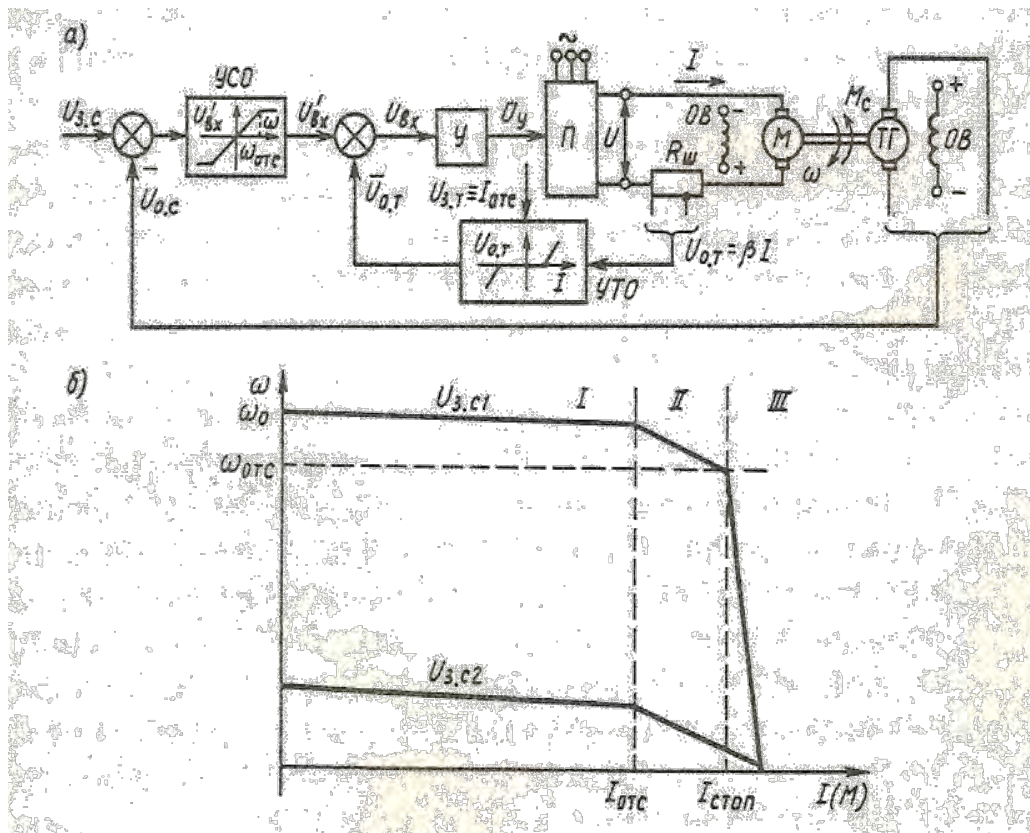


Рис. 8.7. Схема ЭП с нелинейными обратными связями по скорости и току и ее механические характеристики

После формирования требуемых статических характеристик в замкнутом ЭП, построенном по схеме с общим усилителем, может оказаться, что его динамические характеристики неприемлемы - движение в переходных процессах или оказывается неустойчивым, или характеризуется перерегулированием и колебаниями, или имеет значительное время протекания. В этих случаях требуется коррекция законов управления ЭП.

Сущность коррекции динамических характеристик ЭП заключается в том, что в его схему включаются дополнительные (корректирующие) устройства, позволяющие нужным образом изменять эти характеристики. Определение схемы (структуры), параметров и места включения корректирующих устройств, или, как говорят, их синтез, производится по заданным критериям качества переходных процессов методами, разработанными в теории автоматического регулирования и ЭП. Не останавливаясь на описании этих методов и схем используемых корректирующих устройств, отметим, что цель коррекции состоит в получении и использовании в схеме ЭП дополнительных сигналов управления, пропорциональных производным и интегралам от основных сигналов. Другими словами, коррекция динамических характеристик ЭП предусматривает использование дополнительных гибких обратных связей. Эти связи по принципу своего действия проявляют себя только в переходных процессах, участвуя в формировании заданных динамических характеристик ЭП и не изменяя в то же время полученные с помощью жестких (постоянно действующих) обратных связей статические характеристики.

Замкнутые электроприводы с подчиненным регулированием координат. Эффективное и качественное регулирование координат в системе П - Д обеспечивает принцип подчиненного регулирования, реализуемый по структурной схеме, приведенной на рис. 8.4. Напомним, что этот принцип предусматривает регулирование каждой координаты с помощью своего отдельного регулятора и соответствующей обратной связи, т. е. регулирование каждой координаты происходит в собственном замкнутом контуре и требуемые характеристики ЭП в статике и динамике можно получить за счет выбора схемы и параметров регулятора этой координаты и цепи ее обратной связи.

Управление внутренним контуром с помощью выходного сигнала внешнего контура определяет еще одно ценное свойство таких систем. Оно заключается в возможности простыми средствами ограничивать любую регулируемую координату, например ток и момент, на заданном уровне. Для этого требуется всего лишь ограничить сигнал, поступающий с внешнего контура.

Рассмотрим схему ЭП (рис. 8.8, а) с подчиненным регулированием, выходной регулируемой координатой которой является скорость. Управляющая часть схемы состоит из двух замкнутых контуров: контура регулирования тока (момента), содержащего регулятор тока **РТ** и датчик тока **ДТ**, и контура регулирования скорости, содержащего регулятор скорости **РС** и датчик скорости (тахогенератор) **ТГ**.

Регуляторы тока и скорости в большинстве схем ЭП этого типа выполняются на базе операционных усилителей. Включение в цепь задающего сигнала скорости $U_{з.с}$ регулятора скорости **РС** и его обратной связи резисторов $R1$ и $R_{0.c1}$ обеспечивает изменение (усиление или ослабление) этого сигнала с коэффициентом $k_1 = R_{0.c1}/R1$. Аналогично изменение сигнала обратной связи по скорости $U_{0.c}$

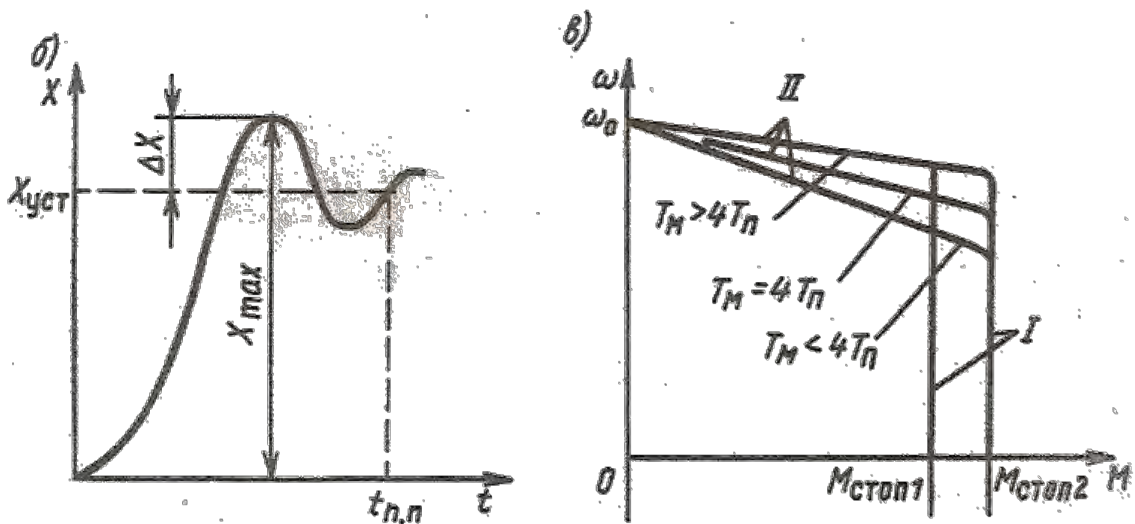
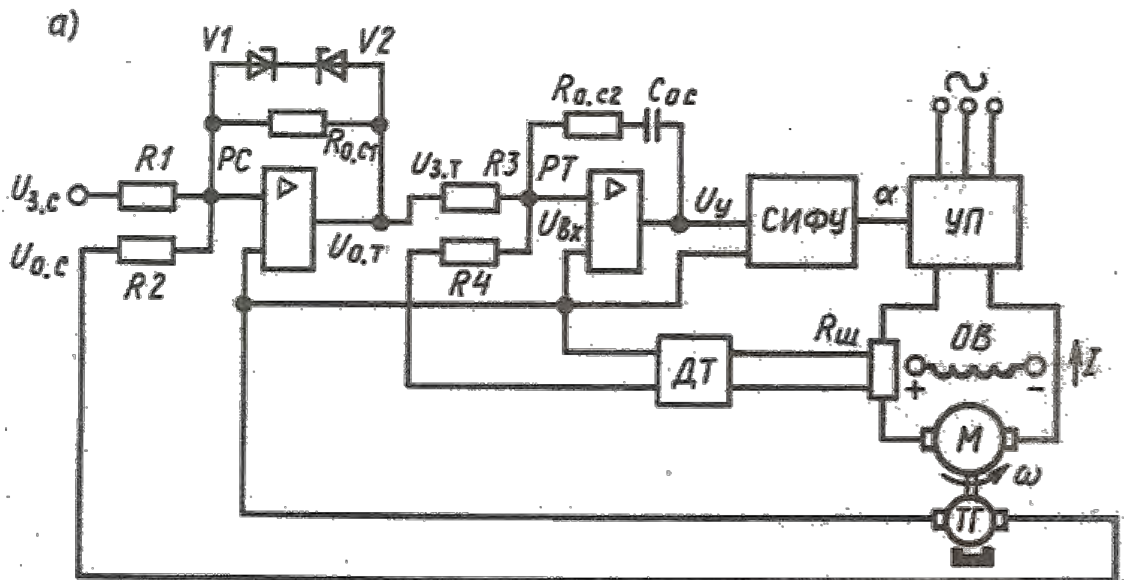


Рис. 8.8. Схема ЭП с подчиненным регулированием, выходной регулируемой координатой которая является скорость, переходной процесс с затухающим колебанием и статические характеристики ЭП

происходит с коэффициентом $\kappa_2 = R_{0.c1}/R2$. Такой регулятор получил название пропорционального регулятора скорости.

При включении в цепь ОУ конденсаторов (реактивных электрических элементов) его функциональные возможности по преобразованию электрических сигналов становятся шире. Так, включение в цепь обратной связи регулятора тока **PT** конденсатора $C_{0.c}$ последовательно с резистором $R_{0.c2}$ позволяет получить на выходе **PT** сигнал в виде суммы двух составляющих:

$$U_y = k_3 U_{вх} + k_4 \int U_{вх} dt, \quad (8.9)$$

где k_3, k_4 – коэффициенты усиления сигналов.

Здесь сигнал U_y содержит пропорциональную и интегральную составляющие входного сигнала $U_{вх}$, т.е. **PT** является в этом случае пропорционально-интегральным (**П - И**) регулятором.

По каким же критериям и условиям выбираются схема и параметры цепей того или иного регулятора? Основным условием здесь является желаемый (задан-

ный) характер переходных процессов при регулировании координат. Из всех возможных их видов обычно выбираются переходные процессы с затухающими колебаниями (см. рис. 8.8, б), что является оптимальным в том смысле, что позволяет обеспечить устойчивость этих процессов при небольших длительностях и перерегулированиях.

Распространенным методом настройки регуляторов является так называемый технический оптимум, при котором перерегулирование $\Delta X = X_{max} - X_{уст}$ составляет 4,3% от установившегося уровня, а время переходного процесса $t_{п.п} = 4,1 T_{п}$, где $T_{п}$ - электромагнитная постоянная времени тиристорного преобразователя, принимаемая обычно равной 0,01 с. В теории ЭП разработаны соответствующие методы расчета параметров цепей регуляторов скорости и тока, обеспечивающих заданный характер регулирования их координат.

Как уже отмечалось, схема подчиненного регулирования позволяет простыми средствами ограничить координаты ЭП заданным уровнем. В схеме, приведенной на рис. 8.8, а, для этой цели в цепь обратной связи РС включены стабилитроны V_1 и V_2 , которые, ограничивая выходное напряжение РС, являющееся входным задающим сигналом (уставкой) тока $U_{з.т}$, ограничивают тем самым ток и момент двигателя заданным уровнем.

На рис. 8.8, в приведены статические характеристики ЭП с подчиненным регулированием координат и настройкой на технический оптимум. Их особенностью является наличие вертикального участка /, на котором обеспечивается ограничение тока и момента, и участка // с жесткими характеристиками, наклон которых зависит от соотношения двух постоянных времени - электромеханической двигателя T_m и электромагнитной преобразователя $T_{п}$.

В схемах подчиненного регулирования используется и другой критерий настройки регуляторов по так называемому симметричному оптимуму, который позволяет получить абсолютно жесткие статические характеристики на участке //, но переходные процессы в этом случае характеризуются большим перерегулированием, достигающим до 55%. При настройке по симметричному оптимуму регулятор скорости РС выполняется пропорционально-интегральным.

Отметим в заключение еще раз, что в силу своих больших функциональных возможностей схемы с подчиненным регулированием координат нашли очень широкое применение в регулируемых ЭП как постоянного, так и переменного тока.

8.4. Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями переменного тока

Замкнутые ЭП с двигателями переменного тока до недавнего времени применялись относительно редко. В последние годы в связи с появлением разнообразных средств управления, и в первую очередь полупроводниковых силовых преобразователей, регулируемый ЭП переменного тока начал быстро развиваться. Рассмотрим некоторые примеры выполнения таких ЭП.

Замкнутый ЭП с частотным управлением АД. Примером замкнутого ЭП переменного тока с частотным управлением может служить привод серии ЭКТ и ее модификации ЭКТ2. Эти ЭП обеспечивают регулирование скорости, тока и момента двигателя за счет изменения частоты и значения подводимого к нему

напряжения. Упрощенная функциональная схема такого ЭП приведена на рис. 8.9, а. Здесь в качестве силового преобразователя используется тиристорный преобразователь частоты со звеном постоянного тока, состоящий из управляемого выпрямителя УВ и инвертора напряжения ИН со своими схемами управления СУВ и СУИ. Между УВ и ИН включен силовой фильтр Ф, обеспечивающий фильтрацию выходного напряжения УВ и необходимую циркуляцию реактивной энергии в силовой части схемы.

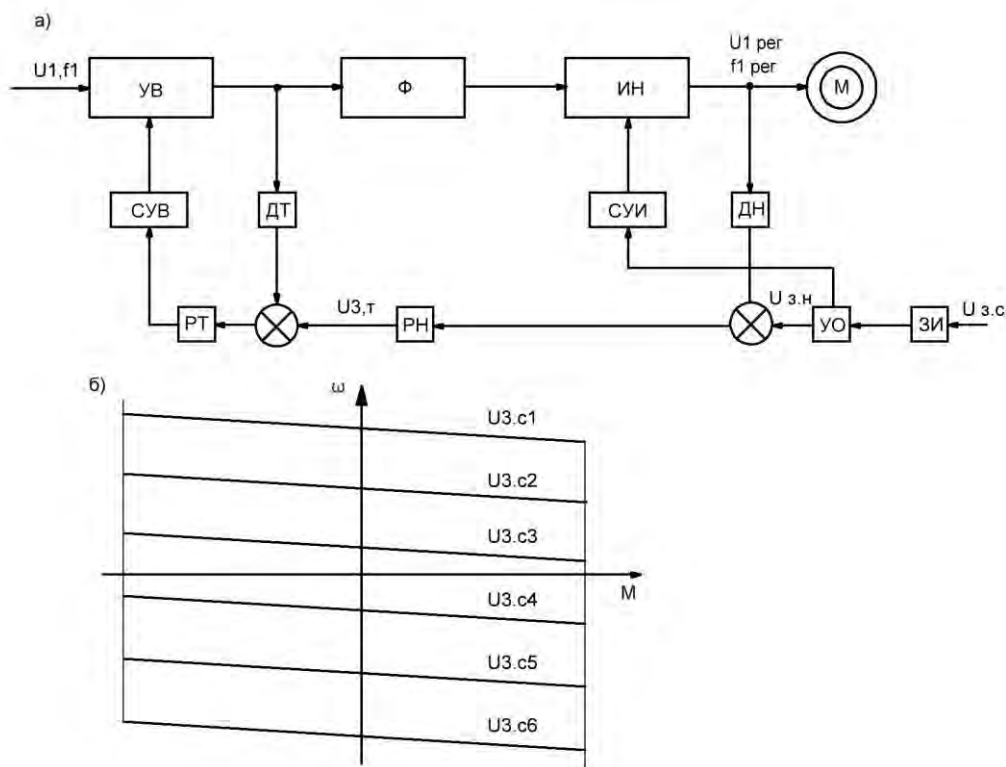


Рис. 8.9. Упрощенная функциональная схема ЭП с частотным управлением АД (а) и примерный вид механических характеристик (б) такого ЭП при различных задающих сигналах скорости $U_{3, c}$

Схема управления такого ЭП строится по принципу подчиненного регулирования координат и имеет два контура - внутренний (тока) и внешний (напряжения). Регулирование этих координат осуществляется пропорционально-интегральными регуляторами тока **РТ** и напряжения **РН** по сигналам датчиков тока **ДТ** и напряжения **ДН**. При частотах ниже номинальной схема управления поддерживает отношение напряжения к частоте постоянным, а при частотах выше номинальной напряжение остается неизменным, что обеспечивается усилителем - ограничителем **УО**.

Преобразователь частоты обеспечивает рабочие диапазоны изменения частоты 5...80 Гц при номинальной частоте 50 Гц и 15... 240 Гц при номинальной частоте 200 Гц. Диапазон регулирования напряжения составляет 0...380 В. Серия ЭКТ2 выпускается на мощности от 16,5 до 263,5 кВт. КПД этих ЭП лежит в пределах 85...96%.

Примерный вид механических характеристик такого ЭП при различных задающих сигналах скорости $U_{3, c}$ показан на рис. 8.9, б.

ЭП этой серии могут обеспечивать торможение с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть. В этом случае силовая часть ЭП дополняется ведомым сетью инвертором, а в обозначении ЭП появляется буква Р (ЭКТР и ЭКТ2Р).

Кроме перечисленных элементов схема управления серии ЭКТ содержит ряд не показанных на ней устройств, обеспечивающих получение необходимых статических и динамических характеристик ЭП, например усилитель сигнала задатчика интенсивности **ЗИ** и устройство устранения колебаний.

Для повышения надежности работы ЭП в схеме предусматривается ряд защит и сигнализаций. Одной из основных является защита по току. Если потребляемый ЭП ток из сети превосходит ток уставки, равный $3 I_{ном}$, то система защиты обеспечивает снятие управляющих импульсов с тиристоров инвертора напряжений и одновременное открытие тиристоров специального узла силового токоограничения, включенного параллельно силовому фильтру Φ . Благодаря этому конденсатор фильтра разрядится через дроссели, что в свою очередь защитит тиристоры **ИН** от пробоя.

Кроме того, в схемах серии ЭКТ предусмотрены защиты от коротких замыканий, снижения питающего напряжения ниже $0,85 U_{ном}$, обрыва фазы, прекращения принудительной вентиляции тиристоров и тепловая.

Тема 9. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ГОРНЫХ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ

9.1. Общие сведения

Электрооборудованием называется совокупность электротехнических устройств и изделий, в которых при их работе производится, преобразуется, передается, распределяется или потребляется электрическая энергия, например электромашинный генератор, трансформатор, электрический аппарат, электродвигатель, электротехнический блок и др.

В зависимости от условий работы электрооборудования различают *электрооборудование общего назначения*, выполненное без учета требований, специфических для определенной отрасли или для определенного назначения, и *специальное электрооборудование*, выполненное с учетом указанных требований. Одним из видов специального электрооборудования является *рудничное электрооборудование*, предназначенное для рудников и шахт.

Особые требования, предъявляемые к рудничному электрооборудованию, обусловлены возможностью образования в подземных выработках взрывоопасной метано-воздушной или пылевоздушной смеси, наличием агрессивных вод и токопроводящей угольной пыли, высокой влажностью окружающего воздуха, повышенной вибрационной и ударной нагрузкой, стесненностью пространства, затрудняющей обслуживание электрооборудования, и др.

На *буровых станках* широко применяются АД с к.з. ротором единой серии в защищенном исполнении, а также многоскоростные АД в закрытом исполнении. В приводе ходовых и подъемных механизмов часто применяют АД в крановом исполнении с к.з. и фазным роторами. Для привода главных механизмов используют краново-металлургические ДПТ НВ в защищенном исполнении. АД применяют преимущественно с частотой вращения 1500 об/мин, ДПТ – 600-900 об/мин.

Регулирование скорости АД производят ступенчато с помощью редуктора или переключением пар полюсов двигателей.

Электропривод вспомогательных механизмов выполняется только на переменном токе.

Все буровые установки питаются от сети переменного тока напряжением 380 В. Подвод питания осуществляется гибкими кабелями от передвижных трансформаторных подстанций.

Способы разрушения горных пород. *Горные породы* – это природные плотные или рыхлые минеральные агрегаты, возникшие в результате геологических процессов и слагающие земную кору в виде самостоятельных геологических тел.

Разрушение горных пород может осуществляться следующими способами:

- *механическим*, когда рабочие органы непосредственно отделяют породу от массива. Расход эл. Энергии на единицу объема разрушенной породы (энергоемкость) составляет $0,2 - 1,7 \text{ кВт.ч/м}^3$;
- *гидравлическим*, когда порода отделяется от массива напорной струей воды, подаваемой из гидромонитора. Энергоемкость – $0,4 - 4 \text{ кВт.ч/м}^3$;

- *взрывным*, когда порода отделяется от массива под давлением газов, выделяемых взрывным веществом. Энергоемкость – 0,8 – 1,1 кВт.ч/м³ (бурение взрывных скважин);
- *физическим*, когда порода отделяется от массива с помощью ультразвука, тока высокой частоты, теплового воздействия;
- *химическим*, когда породу переводят в жидкое или газообразное состояние;
- *комбинированным*, например, гидравлическим с механическим.

На горных предприятиях наибольшее распространение получил механический способ разрушения пород – до 80 % всего объема горных и земляных работ.

Классификация горных машин для открытых работ. По технологическому признаку можно выделить 7 классов горных машин:

- 1) машины для подготовки горных пород к выемке;
- 2) выемочно-погрузочные машины;
- 3) выемочно-транспортирующие машины;
- 4) транспортные машины;
- 5) отвалообразующие машины;
- 6) сортировочно-обогащительное оборудование;
- 7) машины для вспомогательных работ.

Машины каждого класса делятся на группы, в которых типы машин отличаются конструкцией машины или узлов. Так, например, класс выемочно-погрузочных машин делится на группы: одноковшовые экскаваторы и многоковшовые экскаваторы. Группа одноковшовых экскаваторов подразделяется на типы: прямая и обратная лопата, струг, драглайн, грейфер.

Экскаваторы. Режим работы экскаваторов характеризуется частыми пусками и реверсами (несколько сот включений в час механизмов подъема, напора и поворота), быстрым разгоном и остановками. При этом номинальные нагрузки превышают в 2 – 2,5 раза.

В основном оборудовании экскаваторов применяются электродвигатели переменного и постоянного тока. Двигатели главных механизмов экскаваторов (подъема, напора, хода и поворота) работают с резко меняющимися нагрузками, что требует автоматического изменения скорости при изменении нагрузки. Автоматическое изменение частоты вращения вала двигателя в зависимости от момента производится по так называемой экскаваторной характеристике (рис.), которая позволяет обеспечить высокую производительность и возможность безопасного стопорения рабочего органа. Такую характеристику обеспечивает электропривод по системе Г – Д с магнитным (МУ) или электромашинным усилителем (ЭМУ). Работая на такой характеристике, двигатель до некоторого предела не испытывает уменьшения скорости при возрастании нагрузки на его валу, после этого предела скорость резко падает, двигатель останавливается. С уменьшением нагрузки двигатель быстро увеличивает скорость.

Широкое распространение в приводах главных механизмов получили ДПТ по системе Г – Д и УСП – Д (управляемый статический преобразователь – двигатель постоянного тока). Переменный электрический ток высокого напряжения по гибкому кабелю подается на экскаватор и в системе Г – Д питает АД, вращающий генератор постоянного тока.

Система УСП – Д состоит из силового трансформатора, тиристорного преобразователя, дросселя и ДПТ.

Многоскоростные АД в приводе экскаватора позволяют ступенчато регулировать скорость путем изменения числа пар полюсов обмотки статора. С помощью АД с фазным ротором возможно регулировать скорость путем включения в электрическую цепь ротора активных регулировочных сопротивлений.

В *нерегулируемом электроприводе* и в приводе *вспомогательных механизмов* (компрессоры, вентиляторы, грузоподъемные устройства) экскаваторов применяются электродвигатели переменного тока.

Выемочно-транспортующие машины. ВТМ предназначены для разработки и перемещения малосвязанных или хорошо разрыхленных горных пород. К рабочему оборудованию ВТМ относятся тракторы, тягачи с прицепным рабочим оборудованием, бульдозеры, скреперы.

Бульдозер – это самоходная землеройная машина, представляющая собой гусеничный или пневмоколесный трактор, тягач и т.п. с навесным рабочим оборудованием в виде отвала.

Скрепер – это ВТМ, состоящая из ковша с режущей частью и механизма передвижения и предназначенная для послойного отделения породы с поверхности массива, загрузки в ковш, транспортирования и разгрузки породы на месте укладки.

Силовое оборудование ВТМ состоит из силовой установки, передачи (трансмиссии) и устройств для привода исполнительных механизмов. В силовой установке используется двигатель внутреннего сгорания (ДВС).

Ходовые механизмы ВТМ и навесное оборудование могут приводиться в движение с помощью гидрообъемных силовых передач. В электромеханических передачах используются электромагнитные муфты сцепления или тормоза.

На тракторе ДЭТ-250 ДВС приводит в движение электрический генератор, который в свою очередь вращает ДПТ привода механизма хода.

Насосы. Они предназначены для перекачивания жидкостей и в качестве их преимущественно используются центробежные насосы для чистой воды и гидросмесей. В качестве привода для насосов и грунтонасосов наиболее распространены электродвигатели с питанием от трехфазной сети переменного тока низкого (380/220 В) и высокого (до 6 кВ) напряжения. Обычно при мощности до 150 кВт применяются низковольтные двигатели, а при большей мощности – высоковольтные, при этом преимущественно применяются АД с к.з. и фазными роторами. В карьерах при гидромеханизации используются к.з. АД мощностью 250 – 300 кВт, а в некоторых случаях до 500 кВт (при мощности более 300 кВт обычно используются АД с фазным ротором, потребляющие меньшие пусковые токи).

При мощности более 600 кВт используются синхронные двигатели, которые могут улучшать коэффициент мощности электрических сетей предприятия.

9.2. Классификация и особенности исполнения рудничного электрооборудования

Рудничное электрооборудование *по условиям эксплуатации* делится на:

* *стационарное электрооборудование*, не предназначенное для изменения места установки, например электрооборудование насосов главной водоотливной установки, механизмов околоствольного двора, центральных подземных подстанций и др.;

**передвижное электрооборудование*, подвергающееся частым перемещениям (электрооборудование участковой понижающей подстанции, распределителя лавы и др.), а также движущееся при выполнении работ (электрооборудование добычных, проходческих и погрузочных машин, транспортных устройств и др.);

**переносное (ручное) электрооборудование*, находящееся в процессе работы в руках рабочего (переносные светильники, ручные электросверла и др.).

По наличию средств взрывозащиты рудничное электрооборудование делится на:

**рудничное нормальное электрооборудование*, не имеющее средств взрывозащиты;

**рудничное взрывозащищенное электрооборудование*, в котором предусмотрены конструктивные меры с целью устранения или затруднения возможности воспламенения окружающей взрывоопасной среды.

Рудничное взрывозащищенное электрооборудование может иметь различный уровень взрывозащиты, т.е. различную степень взрывозащиты при определенных условиях. В зависимости от уровня взрывозащиты оно делится на:

**рудничное электрооборудование повышенной надежности* против взрыва, в котором взрывозащита обеспечивается только в признанном нормальном режиме его работы;

**рудничное взрывобезопасное электрооборудование*, в котором взрывозащита обеспечивается при нормальном режиме и при признанных вероятных повреждениях, кроме повреждений средств взрывозащиты;

**рудничное особовзрывобезопасное электрооборудование*, в котором по отношению к взрывобезопасному электрооборудованию приняты дополнительные средства взрывозащиты, предусмотренные стандартами на виды взрывозащиты.

Вид взрывозащиты — это установленная совокупность средств взрывозащиты. Для рудничного электрооборудования наиболее широко применяются следующие виды взрывозащиты:

**взрывонепроницаемая оболочка*, выдерживающая давление взрыва внутри нее и предотвращающая распространение взрыва из оболочки в окружающую взрывоопасную среду;

**искробезопасная электрическая цепь*, выполненная так, что электрический разряд или ее нагрев не может воспламенить взрывоопасную среду при установленных условиях испытания;

**защита вида "е"*, заключающаяся в том, что в электрооборудовании (или его части), не имеющем нормально искрящих частей, принят ряд дополнительных мер, которые затрудняют появление опасных нагревов, электрических искри дуг;

**кварцевое заполнение оболочки*, т.е. применение защитного слоя заполнителя (сухого кварцевого песка) вокруг токоведущих или находящихся под напряжением частей.

Рудничное электрооборудование имеет маркировку по взрывозащите, выполняемую рельефными знаками на оболочке: знак **РН**, помещенный в окружность, - для нормального рудничного электрооборудования. Для

взрывозащищенного электрооборудования маркировка состоит из двух частей, в первой части в окружности указывается знак уровня взрывозащиты: **РП** – с повышенной надежностью против взрыва, **РВ** – для взрывобезопасного, **РО** – для особовзрывобезопасного электрооборудования. Во второй части в прямоугольнике указывается вид взрывозащиты: **1В**, **2В**, **3В** или **4В** – взрывонепроницаемая оболочка, **И_а**, **И_в** или **И_с** – искробезопасная электрическая цепь, **П** – защита вида «е», **К** – кварцевое заполнение оболочки.

Классификация электрооборудования по защите от внешней среды. Надежная работа электрооборудования зависит от места его расположения эксплуатации. ГОСТ устанавливает 5 категорий электрических изделий:

1^я категория – изделия, предназначенные для работы на открытом воздухе;

2^я категория – изделия, предназначенные для работы под навесом или в помещениях, где колебания температуры воздуха и влажности практически не отличаются от колебаний на открытом воздухе;

3^я категория – оборудование для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией, где климатические условия не регулируются, колебания температуры и влажности, воздействие пыли и песка значительно меньше, чем на открытом воздухе (это каменные, бетонные, деревянные помещения);

4^я категория – оборудование, предназначенное для работы в отапливаемых или охлаждающихся, хорошо вентилируемых производственных помещениях;

5^я категория – оборудование, предназначенное для работы во влажных помещениях (в том числе в подземных выработках), в местах длительного наличия воды или частой конденсации влаги.

Степень защиты электрооборудования от *прикосновения и попадания посторонних предметов и влаги* имеет буквенное обозначение IP по международной системе обозначений и две цифры: первая цифра (от 0 до 6) означает защиту персонала и степень защиты от попадания твердых тел; вторая цифра (от 0 до 8) – степень защиты от попадания воды в электрооборудование. Например, IP21 означает, что предусмотрена защита от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной более 80 мм и от проникновения твердых тел размером более 50 мм, а вторая цифра (1) означает, что капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать воздействия на изделие.

По защите от *внешней среды* различают: *взрывозащищенное* электрооборудование (для работы во взрывоопасной среде); *влагостойкое* (для работы в условиях повышенной влажности окружающей среды); *морозостойкое* (для работы в условиях пониженных температур); *химически стойкое* (для работы в условиях агрессивной окружающей среды) и *тропическое* (для работы в условиях тропического климата).

9.3. Области применения рудничного электрооборудования

Области и условия применения рудничного электрооборудования с различным уровнем взрывозащиты, а также электрооборудования общего назначения устанавливаются **ПБ** (Правилами безопасности в угольных и сланцевых шахтах) в зависимости от категории шахты по газу, характеристики разрабатываемых пластов, схемы проветривания и др.

Электрооборудование общего назначения временно, с разрешения технического директора производственного объединения допускается применять в шахтах, не опасных по газу или пыли. Светильники общего назначения для освещения забоя могут применяться в этих шахтах при напряжении не выше 24 В, а измерительными приборами общего назначения можно пользоваться во всех выработках этих шахт.

На шахтах, опасных по газу или пыли, допускается применение электрооборудования общего назначения в помещениях вентиляторных и калориферных установок, а также в электромашинных помещениях подъемных установок на стволах с исходящей струей воздуха при условии, что в эти помещения не попадают шахтный воздух и угольная пыль.

Электрооборудование в исполнении РН допускается применять во всех выработках шахт, не опасных по газу или пыли, а также в стволах, околоствольных выработках со свежей струей воздуха и в камерах стационарных установок (проветриваемых за счет общешахтной депрессии) шахт, опасных по газу или пыли, если, шахта не относится к опасным по внезапным выбросам. В шахтах I и II категории по газу с разрешения технического директора производственного объединения допускается применять рудничное нормальное электрооборудование в откаточных выработках со свежей струей воздуха.

Электрооборудование в исполнении РП допускается применять в откаточных выработках со свежей струей воздуха шахт I, II и III категорий по газу и сверхкатегорных или опасных по пыли, если в выработках отсутствует суфлярное выделение метана.

Аккумуляторные электровозы в исполнении РП допускается применять во всех выработках шахт I и II категорий и опасных по пыли. Аккумуляторные светильники индивидуального пользования в исполнении РП допускается применять во всех случаях.

Электрооборудование в исполнении РВ может применяться во всех выработках, где разрешено использование электрооборудования в исполнении РН и РП, и в очистных и подготовительных выработках шахт, опасных по газу или пыли.

Электрооборудование в исполнении РО может применяться во всех случаях без ограничения.

9.4. Рудничные электродвигатели

Для привода машин и механизмов в подземных выработках шахт наибольшее применение получили асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Только на электровозах применяют двигатели постоянного тока последовательного возбуждения и на лебедках и малых шахтных подъемных машинах для откатки по наклонным выработкам применяют асинхронные двигатели с фазным ротором.

Рудничные электродвигатели работают в весьма тяжелых условиях, зависящих не только от рассмотренных выше неблагоприятных характеристик внешней среды и сложности обслуживания, но и от нестабильности режимов работы технологического оборудования и, следовательно, нестабильности нагрузки двигателя.

Рудничные электродвигатели выпускаются в исполнении РН, РП и РВ. В настоящее время наибольшее применение получили взрывобезопасные электродвигатели серий "Кузбасс" (К, КО, КФ, КОФ) и ВАО. В последние годы разработаны и начали выпускаться асинхронные взрывобезопасные двигатели с короткозамкнутым ротором серии ВР.

Двигатели серии "Кузбасс" выпускаются в обдуваемом исполнении КО (с креплением на лапах) и КОФ (с креплением на фланце) и в необдуваемом исполнении К и КФ.

Двигатели серии ВАО (взрывозащищенные, асинхронные, обдуваемые) имеют исполнение по роду монтажа: горизонтальное на лапах; горизонтальное на лапах с фланцевым щитом; горизонтальное без лап с фланцевым щитом.

Рудничные взрывобезопасные асинхронные двигатели новой серии ВР должны постепенно заменить двигатели МА36, КО (КОФ) и ВАО. В серии ВР учтены требования Международной электротехнической комиссии (МЭК) и Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ).

Кроме двигателей основного исполнения серии ВАО и ВР имеют ряд модификаций для привода конкретных механизмов.

К рудничным двигателям в исполнении РН относятся асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором с повышенным скольжением ВАМП, применяющиеся для привода погрузочных машин.

Широко применяют в шахтах асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором ЭДКОФ-4 (4-го габарита) в исполнении РВ для привода стационарных и передвижных конвейеров. Их используют также для привода струговых установок и некоторых очистных комбайнов.

Для привода очистных комбайнов применяются двигатели с воздушным охлаждением серии ЭДК в необдуваемом и серии ЭДКО в обдуваемом исполнении, а также двигатели серии ЭКВ с водяным охлаждением проточной водой.

9.5. Рудничные магнитные пускатели и станции управления

Магнитные пускатели. *Магнитный пускатель* — это коммутационный электрический аппарат для пуска, остановки и защиты электродвигателей. Он состоит из контактора, аппаратов защиты, блокировки и управления, помещенных в общий корпус. Рудничные пускатели имеют взрывонепроницаемую оболочку.

Различают нереверсивные и реверсивные пускатели. Реверсивные имеют два контактора, один из которых включает двигатель в условном направлении "Вперед", а другой — "Назад".

В настоящее время выпускаются магнитные пускатели с искробезопасными цепями управления: нереверсивные серии ПМВИ и серии ПВИ; реверсивные серии ПМВИР (расшифровка букв в обозначениях типов: П - пускатель; М — магнитный; В — взрывобезопасный; И — с искробезопасными цепями управления; Р - реверсивный).

Почти во всех пускателях (кроме ПМВИ-61 и ПМВИР-41) применены унифицированные узлы: устройство МТЗ типа УМЗ и блок управления, содержащий блокировочное реле утечки с уставками срабатывания при напряжении 380 В — 18 кОм и при 660 В — 30 кОм.

На рис. 9.1 показана принципиальная электрическая схема пускателей серии ПВИ. Она обеспечивает следующие виды управления: дистанционное с помощью вынесенных кнопок; дистанционное автоматическое от замыкающего вспомога-

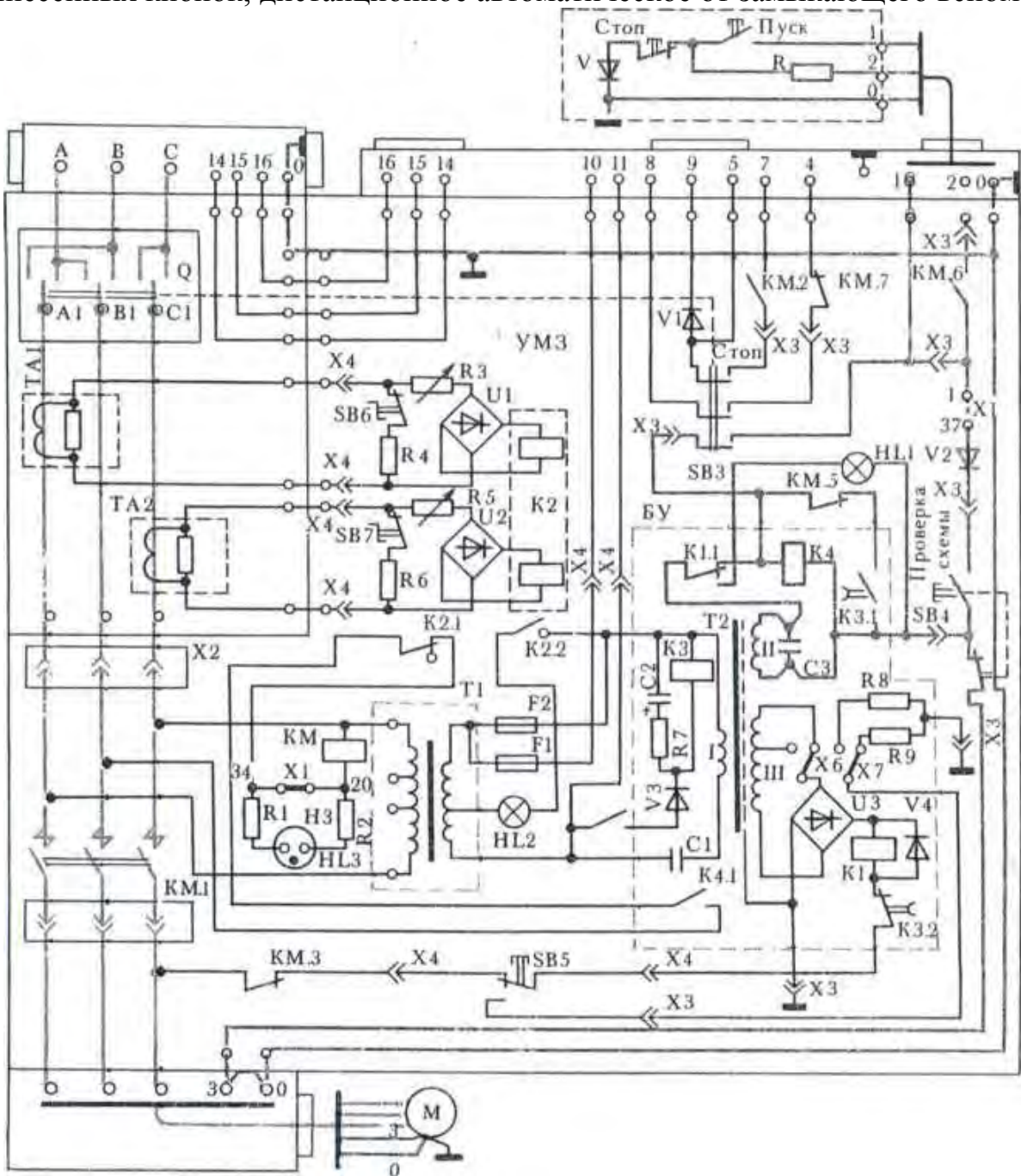


Рис. 9.1. Принципиальная электрическая схема пускателей серии ПВИ

тельного контакта другого пускателя или какого-либо датчика; местное отключение кнопкой "Стоп" на пускателе.

Электрическая схема пускателя обеспечивает также: защиту от токов к.з. отходящих от пускателя силовых цепей и сигнализацию о срабатывании защиты; защиту от потери управляемости при обрыве или замыкании проводов дистанционного управления между собой и с заземляющей жилой; защиту от обрыва или увеличения сопротивления цепи заземления свыше 100 Ом на отключение; нулевую защиту; проверку исправности блокировки от утечки и МТЗ; проверку исправности цепи катушки контактора.

В пускателях серии ПВИ, как и в других выпускаемых в настоящее время пускателях, включающая катушка контактора получает питание через контакт промежуточного реле, присоединенного непосредственно к зажимам вторичной обмотки трансформатора искробезопасной цепи управления. При этом по катушке реле проходит переменный ток. Но сопротивление ее переменному току настолько велико, что ток недостаточен для включения реле. Чтобы реле включилось, параллельно катушке реле и, следовательно, вторичной обмотке трансформатора присоединяют через аппараты управления (например, кнопку) диод. В течение одного полупериода, когда направление тока совпадает с проводящим направлением диода, ток вторичной обмотки трансформатора будет замыкаться через диод, поскольку его сопротивление в прямом направлении значительно меньше сопротивления катушки реле. В этот полупериод вторичная обмотка трансформатора, по существу, замкнута накоротко. В течение следующего полупериода ток вторичной обмотки пойдет только по катушке реле, так как через встречно включенный диод он идти не может. Таким образом, катушка реле будет обтекаться однополупериодным выпрямленным током и реле сработает.

Схема управления пускателем трехпроводная с использованием заземляющей жилы в качестве одного из проводов. При дистанционном управлении в вынесенные посты управления встраиваются диод ∇ и шунтирующий резистор R .

Станции управления. *Станциями управления* называют комплектные устройства управления электроприводами. Их взрывонепроницаемые оболочки состоят из отдельных сварных отсеков, соединенных между собой, или представляют собой корпус, разделенный взрывонепроницаемыми перегородками. В отсеках располагаются коммутационные аппараты и аппаратура управления, защиты, сигнализации и блокировки. Число отсеков в различных станциях — от двух до пяти. Каждый отсек закрывается отдельной быстрооткрываемой крышкой.

Место установки станций управления зависит от их назначения. Так, станции управления СУВК-8 (для управления электродвигателями проходческого комбайна ПК-8) и СУВК-9 (для управления электродвигателями проходческих комбайнов ПК-9р и 4ПП2) устанавливаются на самих комбайнах, станция управления СУВ-350 (для управления электродвигателями машин и механизмов угледобывающих комплексов КМ87 и им подобных) размещается на раме с колесами и устанавливается на штреке около забоя.

9.6. Реле контроля содержания метана в рудничной атмосфере

В настоящее время шахты оснащаются самым современным рудничным электрооборудованием. Современные САУ технологическими процессами являются в основном электрическими или электромеханическими системами. Например, в угольной промышленности автоматизированы водоотливные, вентиляторные и подъемные установки, создана аппаратура телеавтоматического контроля содержания метана в рудничной атмосфере.

При автоматизации производственных процессов в схему управления необходимо вводить данные о значениях технологических параметров в целях выработки соответствующих команд управления. Они необходимы также для сигнализации и автоматической защиты. Такие данные получают с помощью специальных реле контроля технологических параметров. В подземных выработках шахт необходимо также контролировать некоторые параметры окружающей среды, например содержание метана в рудничной атмосфере.

Реле и аппараты контроля технологических параметров классифицируются по виду параметров, на которые они реагируют. По этому признаку различают реле контроля: температуры, положения подвижных частей, скорости, уровня жидкости, заполнения бункеров, содержания метана в рудничной атмосфере и др. Рассмотрим, например, *реле контроля содержания метана в рудничной атмосфере*.

Контроль процентного содержания метана осуществляется с помощью различных аппаратов: аппаратуры систем автоматической газовой защиты и централизованного телеавтоматического контроля метана АМТ-3, метан-реле для забойных машин ТМРК-3, переносного метан-реле СШ-2 и др.

Метан-реле СШ-2 обеспечивает непрерывный автоматический контроль содержания метана и подачу светового и звукового сигнала при недопустимой его концентрации. Реле используется в подготовительных выработках, а также при ведении горных работ, где правилами безопасности предусмотрен контроль метана.

Метан-реле СШ-2 представляет собой компактный аппарат размером 80×150×215 мм и массой 2,5 кг. Основные узлы его смонтированы на передней панели и монтажной панели. Указатель метана *P* (рис. 9.2,а), вольтметр *PV*, датчик *B1* и *B2*, выключатель *SA*, сигнальная лампа *HL* и кнопка *SB* переключения шкалы указателя метана на "4 % CH_4 " вынесены на переднюю панель.

Датчик метан-реле (датчик в сборе), расположенный в корпусе *1* (рис. 9.2, б), состоит из рабочего *3* и сравнительного *4* элементов. Оба элемента находятся в общей камере сгорания *2*, что исключает влияние изменения параметров окружающей среды на точность показаний. Рабочий и сравнительный элементы представляют собой цилиндры из активной окиси алюминия с намотанными на них спиралями из платиновой проволоки. На поверхность рабочего элемента нанесен, кроме того, слой платины и палладия. Концы платиновых спиралей приварены к выводным шпилькам колодки *5*, которая закреплена в обойме *7* специальной гайкой *6*.

Анализируемый воздух поступает в камеру сгорания в результате диффузии и конвекции через жалюзи.

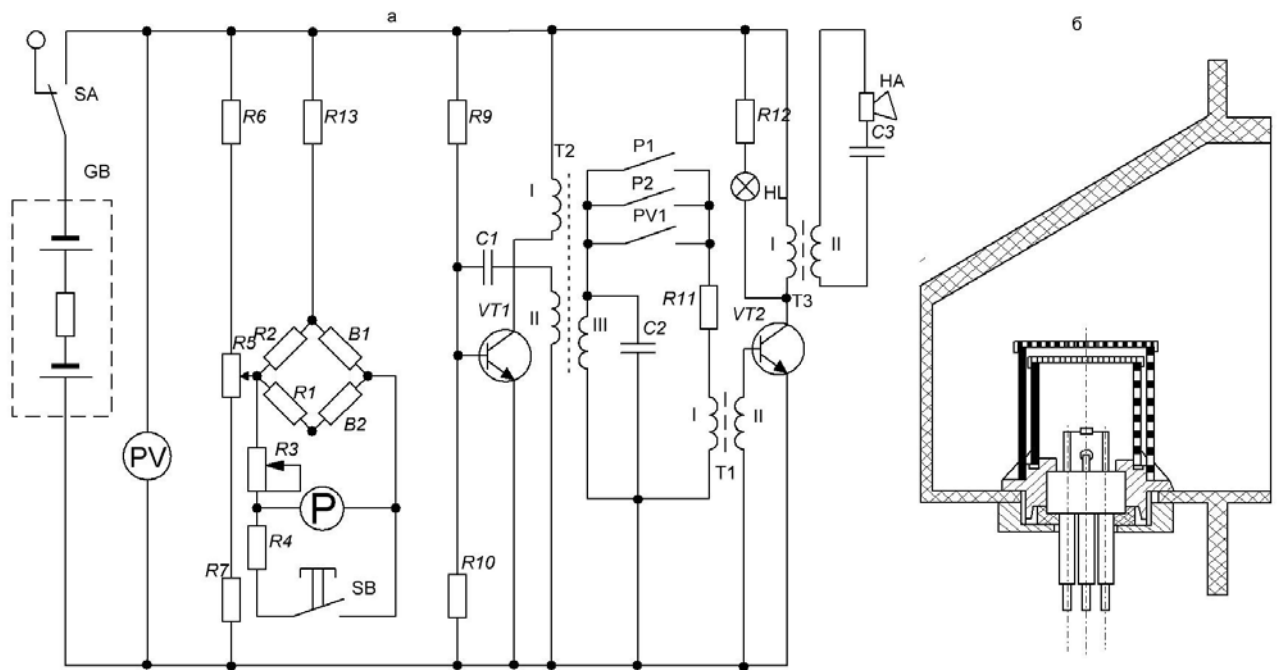


Рис. 9.2. Электрическая схема (а) и конструкция датчика (б) метан – реле СШ-2

Принцип действия реле основан на измерении термоэффекта при беспламенном сжигании метана на поверхности платино-палладиевого катализатора при температуре 360 — 400 °С. Начальный разогрев катализатора до этой температуры производится платиновой спиралью датчика *B1* (см. рис. 9.2, а), по которой проходит ток от источника *GB*. При отсутствии метана в воздухе измерительный мост уравновешен. Когда появляется метан и сгорает на рабочем элементе *B1*, то выделяется дополнительное тепло, увеличиваются температура и сопротивление спирали, в результате чего нарушается равновесие мостовой схемы.

В измерительную диагональ мостовой схемы включен указатель метана *P* (индикатор напряжения М257). Если концентрация метана достигнет недопустимого значения (2 %), стрелка указателя метана *P* отклонится до конца шкалы и замкнет правый контакт *P.1*, который включит световую *HL* и звуковую *HA* сигнализацию. Первоначальное уравнивание мостовой схемы (при отсутствии метана) производится переменным резистором *R5*.

Для подачи аварийного сигнала служит генератор, выполненный на транзисторе *VT1* и трансформаторе *T2*, обмотка *II* которого вместе с конденсатором *C1* образуют цепь положительной обратной связи. Сигнал от генератора на усилительный каскад, выполненный на транзисторе *VT2*, подается при замыкании одного из контактов *P.1*, *P.2* или *PV.1* через промежуточный трансформатор *T1*.

Контакт *P.1*, как указывалось выше, замыкается при увеличении концентрации метана сверх допустимой. Кроме того, контакт *P.1* или *P.2* замыкается при обрыве или закорачивании одного из плеч мостовой схемы. Контакт *PV.1* вольтметра *PV* замыкается при понижении напряжения до 2,05 В, сигнализируя о разряде источника питания *GB*.

9.7. Рудничные аппараты напряжением выше 1000 В

Рудничные высоковольтные коммутационные аппараты выпускаются в виде комплектных распределительных устройств (КРУ). Они предназначены для распределения электрической энергии в сетях напряжением 6 кВ, защиты сетей и управления электроприемниками угольных шахт, опасных по газу и пыли (устанавливаются в подземных подстанциях). Выпускаются КРУ типа РВД-6 и ЯВ-6400.

КРУ РВД-6. В этом КРУ в качестве коммутационного аппарата используется масляный выключатель баковый ВМБ-10, в котором контактная система погружена в трансформаторное масло (для интенсивности гашения дуги, образующейся между подвижными и неподвижными контактами при отключении нагрузки, а так же для изоляции фаз друг от друга и от корпуса). КРУ устанавливают в специальных противопожарных помещениях (камерах), так как трансформаторное масло является горючей жидкостью.

КРУ ЯВ-6400. Они являются взрывобезопасными. В них использован воздушный автоматический выключатель ВС-6400 с электромагнитным гашением дуги, снабженный механизмом свободного расцепления (МСР) и пружинным приводом, который взводится вручную или с помощью электромагнита. Данные КРУ выпускаются на токи от 20 до 400 А.

Тема 10. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

10.1. Общие сведения

Электрическая система и ее составные части. В соответствии с ПУЭ (Правилами устройства электроустановок) совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, связанных между собой общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической и тепловой энергии, называется *электрической системой*. Ее составными частями являются электрические станции (ЭС), подстанции, линии электропередачи (ЛЭП) и тепловые сети.

Подстанцией называется электроустановка, предназначенная для преобразования и распределения электрической энергии (ЭЭ) и состоящая из трансформаторов или других преобразователей ЭЭ, распределительных устройств, устройств управления и вспомогательных сооружений.

Электроустановкой называется совокупность аппаратов, машин, линий, вспомогательного оборудования и помещений, предназначенных для производства, преобразования, распределения, накопления и передачи ЭЭ.

Под *электроснабжением* понимается обеспечение потребителей электрической энергией.

Потребитель ЭЭ – это группа электроустановок, объединенных основным технологическим процессом или сопровождающих его в рамках целого предприятия, цеха или участка.

Приемник ЭЭ – это аппарат, машина, механизм, в котором происходит преобразование ЭЭ (для ее использования) в другие виды энергии.

Распределительным устройством (РУ) называется электроустановка, служащая для приема и распределения ЭЭ, содержащая коммутационные аппараты, сборные и соединительные шины, устройства защиты и автоматики, а также вспомогательные устройства. По использованию РУ бывают открытыми (ОРУ) и закрытыми (ЗРУ).

ЛЭП называется система проводов, служащая для передачи ЭЭ от ЭС к потребителям и распределения между электроприемниками.

10.2. Характеристики потребителей и приемников ЭЭ

Потребителями ЭЭ являются крупные промышленные предприятия (фабрики, заводы), электрический транспорт, шахты, горно-обогатительные комбинаты (ГОКи) разрезы, жилые и общественные здания и др., имеющие разнообразные электроприемники. Различные предприятия имеют электрические нагрузки от сотен до миллиона киловатт. Особенно это характерно для ГОКов, где установленная мощность отдельных приемников (дробилки, мельницы) достигает 2500 кВт и более.

Горные предприятия разделяют на две основные группы: предприятия с подземной добычей полезных ископаемых и предприятия с открытой добычей.

На предприятиях с подземной добычей электроприемники располагаются как на поверхности, так и в подземных выработках. На поверхности располагаются подъемные установки с мощностью электроприводов до 5000 кВт и более, венти-

ляторные установки с синхронными электродвигателями мощностью до 3500 кВт и компрессоры до 5000 кВт. Напряжение питания таких приемников – 6-10 кВ.

На добычных и подготовительных участках в подземных выработках работают очистные и проходческие комплексы с установленной мощностью 450-800 кВт.

На современных открытых горных работах суммарная мощность экскаваторов достигает 8000 кВт, а у комплекса роторного экскаватора – до 12000 кВт при напряжении 6-10 кВ.

В установках, не требующих регулирования скорости, применяются электроприводы переменного тока (асинхронные и синхронные). На электродвигатели переменного тока приходится около 70% суммарной мощности.

10.3. Категории электроприемников и обеспечение надежности

Электроприводы, а также электротехнологические, электротермические и светотехнические устройства и установки представляют собой совокупность электроприемников, от надежной работы которых зависит нормальный ход технологических процессов. Каждый из этих приемников требует различной степени надежности электроснабжения. Могут быть такие приемники, перерыв в электроснабжении которых недопустим даже на короткий срок, необходимый дежурному персоналу на переключения, связанные с восстановлением электропитания. Иногда перерывы в электроснабжении могут привести к образованию взрывоопасных концентраций газов (например, в шахте), что опасно для жизни людей.

В соответствии с характером ущерба электроприемники по обеспечению надежности согласно ПУЭ разделяются на 3 категории:

1^я категория – электроприемники, нарушение электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный ущерб производства в масштабах страны, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса (примеры: доменные печи, водоотливные установки шахт и карьеров, вентиляторные установки шахт, метрополитенов и др.).

Из состава электроприемников 1-ой категории выделяют **особую группу электроприемников**, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения основного дорогостоящего оборудования.

2^я категория – электроприемники, перерыв в электроснабжении которых приводит к массовому недоотпуску продукции, длительным простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта (прокатные станы, скиповые подъемные установки шахт и рудников и др.).

3^я категория – все остальные электроприемники, не подходящие к определениям 1-ой и 2-ой категорий: вспомогательные производства, транспорт породы, механические мастерские и т.д.

Согласно ПУЭ допускаются перерывы в электроснабжении:

а) электроприемников 1-ой категории на время автоматического ввода резервного питания при условии электроснабжения их от двух независимых источников питания.

Для электроснабжения особой группы электроприемников должно предусматриваться питание от третьего независимого источника (аккумуляторные батареи, дизель-электрические станции);

- б) электроприемников 2-ой категории на время, необходимое для включения резервного питания дежурным персоналом или выездной оперативной бригадой;
- в) электроприемников 3-ой категории на время, необходимое для ремонта и замены поврежденных элементов системы электроснабжения, но не более суток.

Таким образом, отнесение потребителей к той или иной категории определяет степень резервирования, что влияет на капитальные вложения. *Поэтому в каждом конкретном случае необходимость в резервировании следует подтверждать технико-экономическим обоснованием.*

10.4. Характерные схемы питающих и распределительных сетей

Основными источниками питания (ИП) большинства предприятий являются ЭС и сети энергосистем. Для приема ЭЭ от ИП и распределения ее между электроприемниками предприятия служит электроустановка, называемая *пунктом приема ЭЭ* (ППЭ). Типы ППЭ и их число определяется мощностью предприятия и характером распределения электрической нагрузки на его территории.

Если предприятие потребляет значительное количество ЭЭ и ИП удален, то прием ЭЭ производится на *узловых распределительных подстанциях* (УРП) или на *главных понизительных подстанциях* (ГПП) напряжением 35 – 220(330) кВ.

УРП называется центральная подстанция предприятия напряжением 35 – 220 (330) кВ, получающая ЭЭ от энергосистемы и распределяющая ее на более низком напряжении (6 – 35 кВ) по всему предприятию (или отдельному его району).

Если ИП находится на близком расстоянии от промплощадки предприятия, а потребляемая мощность обеспечивается линией 6 – 10 кВ, то ЭЭ подводится к *центральному распределительному пункту* (ЦРП) или к *распределительному пункту* (РП).

ЦРП называется установка, получающая питание непосредственно от энергосистемы или подстанции предприятия при напряжении 6 – 20 кВ и распределяющая ее при этом же напряжении по всему предприятию.

РП предназначен для приема и распределения ЭЭ при одном напряжении 6 – 20 кВ.

Количество приемных пунктов (ПП) на предприятии определяется общей схемой электроснабжения, величиной необходимой мощности, размещением нагрузки, требуемой степенью бесперебойности.

Системы электроснабжения разделяют на внешние и внутренние: *внешние* – от ИП до приемных подстанций предприятия; *внутренние* – на территории предприятия.

Для крупных предприятий наиболее экономичной и надежной является система электроснабжения с применением *глубокого ввода 35 – 220 кВ*, при котором высокое напряжение максимально приближено к потребителям ЭЭ.

ЭЭ от ИП к пунктам приема ЭЭ (ППЭ) на промышленные предприятия (ПП) подается, как правило, по *радиальным* или *магистральным* (рис. 10.1- 10.4) линиям.

Радиальные схемы, как правило, применяются, когда ТП размещены в различных направлениях от ИП. Радиальные схемы содержат большое количество коммутационных аппаратов и линий 6 – 10 кВ. Поэтому применять их нужно при

надлежащем обосновании для питания достаточно мощных и ответственных по-

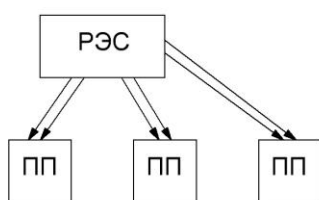


Рис. 10.1. Схема питания ППЭ по двум радиальным линиям

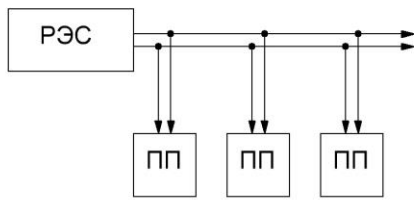


Рис. 10.2. Схема питания ППЭ по двум магистральным линиям

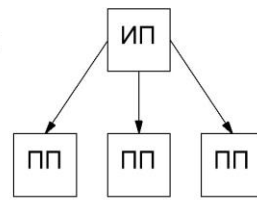


Рис. 10.3. Схема одиночных радиальных линий ПП

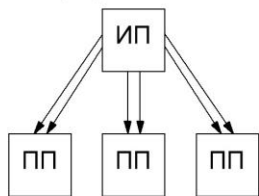


Рис. 10.4. Схема двойных радиальных линий ПП

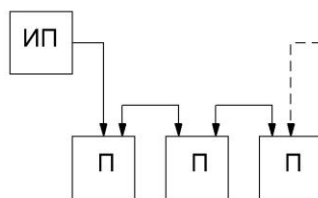


Рис. 10.5. Схема одиночной цепочной линии

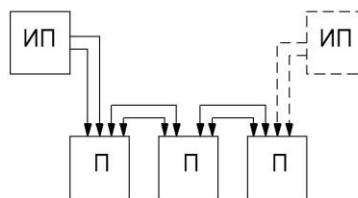


Рис. 10.6. Схема двойной цепочной линии

требителей.

Достоинствами радиальных схем являются: удобство эксплуатации, высокая надежность работы, возможность применения простой и надежной защиты и автоматики.

Магистральные схемы распределительных сетей позволяют уменьшить число звеньев коммутации, что является основным их преимуществом по сравнению с радиальными. Данные схемы целесообразны при распределенных нагрузках, при упорядоченном, приближающемся к линейному расположению ТП на территории промышленного объекта. *Недостатками* магистральных схем являются: усложнение конструктивного исполнения высоковольтного вводного устройства цеховых ТП по сравнению с радиальными схемами, в которых трансформаторы в большинстве случаев присоединяются наглухо; одновременное отключение нескольких трансформаторов, присоединенных к магистрали, при ее повреждении. В схемах электроснабжения ПП наибольшее распространение получили одиночные и двойные сквозные магистрали.

Электроснабжение горных предприятий осуществляется следующими основными способами:

- От автономных источников питания;
- От собственных электростанций, связанных с энергетической системой;
- От энергетических систем;
- От автономных, несвязанных друг с другом тепловых электростанций, а также от передвижных дизель электростанций питаются шахты и рудники небольшой производительности, расположенные в малоосвоенных районах и удаленные от ЛЭП энергосистемы.

Небольшое число предприятий имеют собственные промышленные электростанции. Они работают с использованием добываемого топлива, связаны ЛЭП с энергосистемами и могут поставлять электроэнергию энергосистемам. [4]

Системы электроснабжения разделяют на внешние и внутренние. Под системой внешнего электроснабжения понимают комплекс сооружений, обеспечивающих передачу электроэнергии от источника питания до приемных подстанций

предприятия. Система внутреннего электроснабжения — комплекс подстанций и сетей, находящихся на территории предприятия.

Для крупных предприятий наиболее экономичной и надежной является система электроснабжения с применением глубокого ввода 35+220 кВ, при котором высшее напряжение максимально приближено к потребителям электроэнергии. В большинстве случаев глубокий ввод осуществляется непосредственно от энергосистемы.

Распределение ЭЭ на самом предприятии производится по *радиальным, магистральным или смешанным схемам* в зависимости от размещения нагрузки, их значения, требуемой надежности питания и других особенностей проектируемого предприятия.

Схемы электроснабжения строятся по *ступенчатому принципу*. Обычно применяют 2-3 ступени, так как при их большем числе ухудшаются условия эксплуатации и технико-экономические показатели.

1-я ступень – сетевое звено между ИП (УРП, ТЭЦ, ГПЭ) и ПГВ, если распределение производится при напряжении 110 - 220 кВ, или между ГПП и РП 6 (10) кВ, если напряжение распределительной сети 6 (10) кВ.

2-я ступень – сетевое звено между РП и РУ вторичного напряжения ПГВ и трансформаторными подстанциями (ТП) или же отдельными электроприемниками напряжением 6 – 10 кВ: электродвигателями, преобразователями и др.

3-я ступень – сетевое звено между ТП и приемниками ЭЭ напряжением до 1 кВ.

Радиальные сети питания могут быть одиночными для потребителей 3-ей категории, а также 2-й, если прекращение их работы не ведет к значительному ущербу (рис. 10.3).

Для потребителей 1-й категории и ответственных 2-й – применяют *двойные радиальные линии* (рис. 10.4).

При передаче ЭЭ в одном направлении широко применяют *магистральные линии* (одиночные или двойные) с односторонним питанием (с глухими отпайками) – при воздушных линиях. При кабельных линиях применяют *цепочные линии* – одиночные или двойные (с заводом магистральной линии на РП или к потребителю П (рис. 10.5, 10.6).

Одиночные и двойные магистральные линии с двухсторонним питанием применяют при питании от двух независимых ИП по условиям надежности.

Кольцевые магистрали применяют при таком распределении потребителей, при котором целесообразен охват их одной кольцевой линией.

Обычно на предприятиях распределение ЭЭ осуществляется по *смешанным схемам*, составленным из отдельных основных схем (из технико-экономических соображений).

Существуют два вида учёта электроэнергии:

Коммерческий - осуществляется по расчётным счётчикам для финансового расчёта с электроснабжающей организацией. Счётчики устанавливаются с высокой стороны (35-110 кВ).

Технический - по контрольным счётчикам, для анализа расхода электроэнергии внутри предприятия. Счётчики устанавливаются на ГПП шахты и дают возможность определить расход энергии по службам, цехам, подразделениям.

Изменённый прејскурант предусматривает два вида тарифов – одно- и двухставочный:

- **Одноставочный** тариф состоит из платы за 1 кВт/ч отпущенной потребителю активной электроэнергии.

- **Двухставочный** состоит из годовой платы за 1 кВт заявленной (договорной, абонированной) потребителем максимальной мощности, участвующей в максимуме нагрузки энергосистемы и платы за 1 кВт/ч потреблённой активной электроэнергии. Заявленная – это наибольшая получасовая электрическая мощность. Часы максимума нагрузки устанавливаются электроснабжающей организацией поквартально, в соответствии с режимом нагрузки энергосистемы. Заявленная мощность фиксируется поквартально в договоре и периодически контролируется электроснабжающей организацией по фактическому получасовому максимуму активной нагрузки ($P_{\text{факт}}$). Если $P_{\text{факт}} > P_{\text{мах. договорной}}$, в конце квартала производится перерасчёт суммы оплаты по $P_{\text{факт}}$. Если $P_{\text{факт}} \leq P_{\text{мах. договорной}}$, оплата производится по величине, указанной в договоре.

Для стимулирования деятельности предприятий, по рациональному потреблению электроэнергии применяют скидки и надбавки к тарифу за компенсацию реактивной мощности и поддержание показателей качества (для первых трёх тарифных групп).

Методы экономии энергии:

1. Устранение недогруза электроустановок, устранение холостой работы;
2. Совершенствование системы электроснабжения;
3. Борьба с потерями эл. энергии в кабельных и воздушных линиях электропередач;
4. Борьба с утечками тока (реле утечки);
5. Совершенствование технологии горных работ;
6. Отключение в ремонтные смены, выходные и праздники от источника питания;
7. Нормирование расхода электрической энергии. [4]

Электроснабжение потребителей участка шахты

Распределение электроэнергии в шахте. Шахты получают питание от районных подстанций. Она поступает на главную поверхностную подстанцию (ГПП). **Подстанция** – это предприятие, предназначенное для преобразования электроэнергии одного напряжения в другое, а также для распределения электроэнергии между потребителями.

Для шахт характерно наличие электроустановок первой категории (это подъемные и главные вентиляторные установки и водоотливные установки). Потребителями первой категории являются также подстанции, питающие указанные установки. Для потребителей первой категории предусматривается резервное питание.

Для электроснабжения добычных и подготовительных участков при меняют два способа:

питание через ствол – способ, применяющийся при глубоком залегании пластов (свыше 200 м);

питание через шурфы и специально пробуренные энергоскважины.

При питании через ствол (рис. 10.2) ЭЭ от ГПП подается на центральную подземную подстанцию (ЦПП), расположенную в околоствольном дворе и представляющее

собой распределительное устройство из КРУ ЯВ-6400 или РВД-6.

Для бесперебойного снабжения ЭЭ на ЦПП применяют секционированную систему шин. В каждой секции имеются вводное 1 и фидерные 2 КРУ. Секции соединяют секционным КРУ 3, которое при нормальной работе должно быть отключено.

Питание на участковые передвижные подстанции ПУПП подается или непосредственно от фидерных КРУ 2 ЦПП, или через распределительные пункты (РП) высокого напряжения РП-6.

На схеме электроснабжения конкретной шахты наносится вся кабельная сеть с указанием номинальных напряжений, марок, длин и сечений кабелей, вся распределительная, защитная и пусковая аппаратура, а также все электроприемники с указанием их мощности.

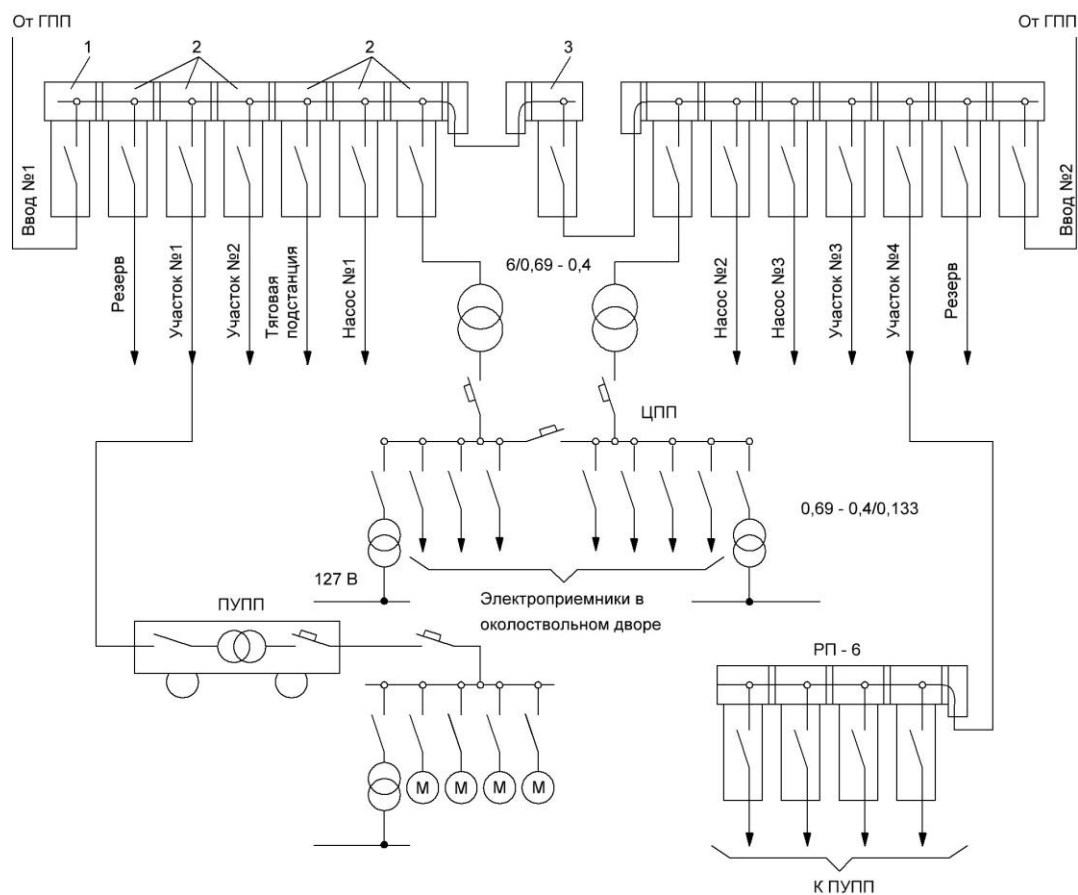


Рис. 10.2. Принципиальная схема распределения электроэнергии в шахте при питании через ствол

Схемы электроснабжения участка. ЭЭ напряжением 380 или 660 В от ПУПП поступает на участок, где для распределения энергии между шахтными машинами и механизмами и для управления ими устраиваются распределительные пункты (РП).

Схемы электроснабжения очистных и подготовительных участков на различных шахтах угольных бассейнов весьма разнообразны. На рис. 10.3 для примера

показаны принципиальная схема силовых цепей и схема присоединений электрооборудования очистного и подготовительного участков для системы разработки лава – этаж и проходки откаточного штрека узким ходом. В данном случае оборудуют три РП: РП лавы, РП штрека и РП тупиковой выработки. РП комплектуются из автоматических выключателей и пускателей.

На схеме электроснабжения участков наносят: кабельную сеть с указанием марок, длин и сечений кабелей, распределительную и защитную аппаратуру, все токоприемники, уставки тока срабатывания максимальной защиты, номинальные токи плавких вставок предохранителей и направление вентиляционной струи.

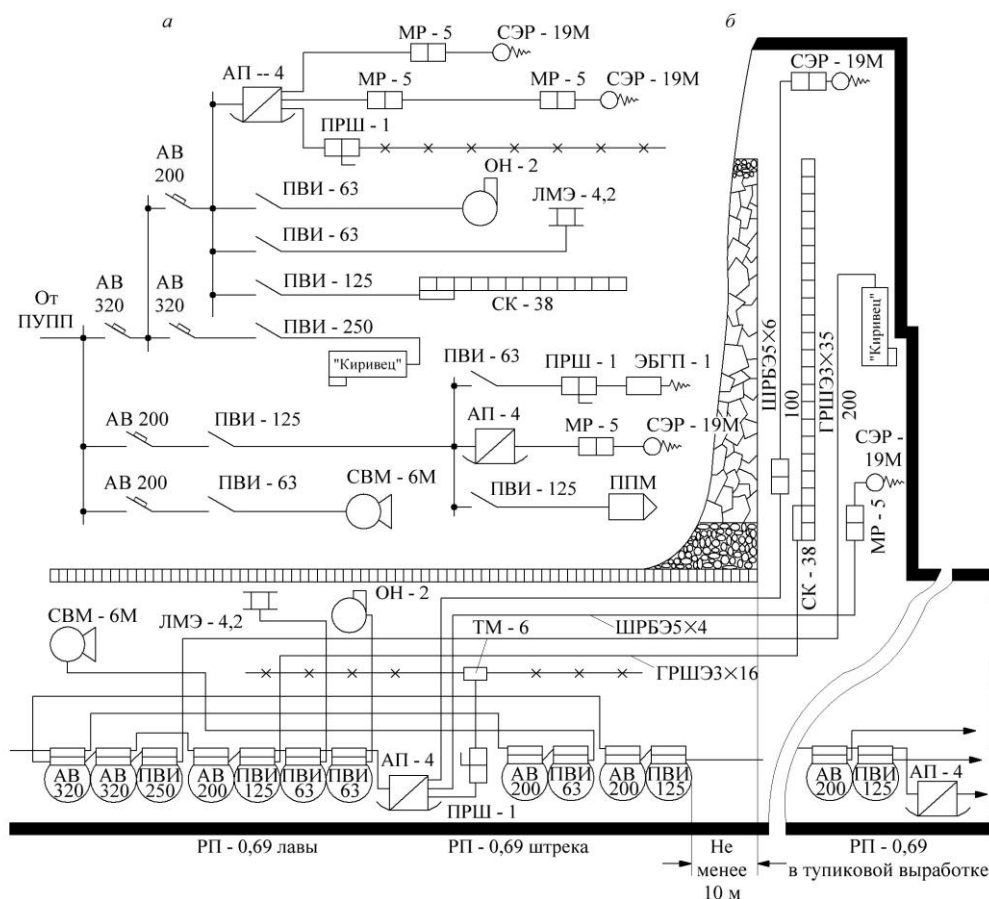


Рис. 10.3. Пример схемы электроснабжения участка

10.5. Электрические сети и их расчет

Электрическая сеть – это совокупность устройств, служащих для передачи и распределения электроэнергии от ее источников к электроприёмникам. Электрическая сеть общего назначения, по которым передается и распределяется около 98% всей вырабатываемой электроэнергии, объединяют электростанции и потребителей электроэнергии в электрические системы, а также системы между собой посредством воздушных и кабельных линий электропередачи (ЛЭП). Электрическая сеть обеспечивают надёжное централизованное электроснабжение территориально рассредоточенных потребителей при требуемом качестве электроэнергии и высоких экономических показателях.

Преимущественное распространение получили электрические сети переменного тока. Электрические сети напряжением до 220 В применяют для питания электроприёмников малой мощности (осветительные бытовые приборы, электрические аппараты и др.). В условиях повышенной опасности, например для местно-

го освещения рабочих мест на промышленных предприятиях, используют напряжение не выше 36 В, а в шахтах - 12 В. Электрическая сеть напряжением 380 В - 10 кВ предназначаются для питания более мощных электроприёмников, главным образом крупных электродвигателей. Электрические сети напряжением 6 кВ и выше используют в основном для передачи и распределения электроэнергии с последующим понижением напряжения. Питающие сети и большая часть распределительных сетей выполняются воздушными линиями электропередачи. Электрические сети (ЭС), расположенные на открытых территориях вне зданий, часто выполняют также воздушными линиями.

Задача расчета электрических сетей состоит в таком выборе сечения проводов и защиты, чтобы во время эксплуатации к зажимам приемников электроэнергии подводилось или номинальное напряжение $U_{ном}$, или весьма мало отличающееся от него, а также, чтобы при длительном токе в проводах они не нагревались выше допустимой для них температуры.

Кроме того, при возникновении ненормальных режимов в сети (большой пусковой ток или короткое замыкание) защита должна вовремя срабатывать и защищать сеть и оборудование от разрушений. Поэтому для правильного выбора сечения проводов, предохранителей и расцепителей автоматов необходимо знать расчетную нагрузку приемников электрической энергии участка или всей сети, т. е. потребляемую мощность отдельных приемников и общую их сумму.

Исходными величинами являются: номинальная мощность $P_{ном}$, которая указывается в паспорте каждого приемника электроэнергии, номинальное напряжение $U_{ном}$, коэффициент мощности $\cos\phi$ и коэффициент спроса K_c .

Очевидно, что мощность, потребляемая энергоприемником из электрической сети, может значительно отличаться от суммы номинальных мощностей этих приемников в основном из-за неодновременной их работы. Поэтому при расчете электрических сетей необходимо исходить не из суммы номинальных мощностей $P_{уст}$ установленных электроприемников, а из расчетной мощности P_p или коэффициента спроса K_c :

$$K_c = \frac{P_p}{P_{уст}}. \quad (10.1)$$

Расчет электрических сетей производится на нагревание, потерю напряжения и экономическую плотность тока.

Расчет электрических сетей на нагревание. Расчет электрических сетей *на нагревание* сводится к подбору проводников таких сечений, допустимые длительные токовые нагрузки которых равны расчетным силам тока данного участка сети или больше их. Выбранные таким образом провода или кабели проверяются затем *на потерю напряжения*.

Величина расчетного тока I_p однофазного приемника при включении в двухпроводную сеть переменного тока определяется по формуле:

$$I_p = \frac{P_p}{U_{ном} \cos\phi}, \quad (10.2)$$

где P_p — расчетная нагрузка, Вт;

$U_{ном}$ — номинальное напряжение, В.

Для ламп накаливания и нагревательных приборов $\cos \varphi = 1$ и поэтому для таких приемников, а также для сетей постоянного тока применяется формула:

$$I = \frac{P_p}{U_{ном}}. \quad (10.3)$$

Примеры расчета электрических сетей:

Пример 1. Рассчитать силу тока и подобрать сечение провода для теплового вентилятора ТВ-1, подключенного к сети однофазного переменного тока напряжением $U_{ном}=220$ В, если потребляемая мощность при работе вентилятором равна 15 Вт, а при работе нагревателем — 800 Вт. Коэффициент мощности электродвигателя равен 0,85.

Решение:

а) при работе вентилятором: $I = \frac{P_p}{U_{ном} \cdot \cos \varphi_{ном}} = \frac{15}{220 \cdot 0,85} = 0,08$ А;

б) при работе нагревателем: $I = \frac{P_p}{U_{ном}} = \frac{800}{220} = 3,63$ А.

Если использовать провод марки АПР, то согласно табличному справочнику вполне удовлетворяет провод сечением 1 мм^2 .

Пример 2. Рассчитать на нагревание трехфазную кабельную линию, проложенную в земле в одной траншее с тремя другими кабелями для питания цехового распределительного щита, если расчетная мощность $P_p = 100$ кВт, напряжение $U_{ном} = 380$ В, $\cos \varphi = 0,8$.

Решение:

$$I = \frac{P_p}{\sqrt{3} U_{ном} \cdot \cos \varphi} = \frac{26600}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,8} = 190 \text{ А}.$$

Поправочный коэффициент на число работающих кабелей при расстоянии между ними не менее 100 мм (число кабелей 4) составит 0,8. Выбираем кабель с алюминиевыми жилами марки АСБГ сечением $3 \times 95 \text{ мм}^2$.

Защита электрической сети от сверхтоков

Электрические провода и электродвигатели в установках напряжением до 1000 В необходимо защитить от сверхтоков (короткого замыкания или перегрузок). Это осуществляется при помощи предохранителей с плавкими вставками, максимальными автоматами с расцепителями и магнитными пускателями с тепловым реле. При выборе указанных защитных аппаратов учитывают, что при пуске в ход двигателя возникает очень кратковременное превышение силы тока, которое может быть в несколько раз больше номинальной силы тока электродвигателя.

Плавкая вставка предохранителя и расцепитель автомата должны быть рассчитаны на номинальную силу тока при его длительном протекании в цепи. Однако известно, что сила пускового тока короткозамкнутых асинхронных электродвигателей в 4–6 раз больше номинальной силы тока. При этих пусковых токах плавкая вставка успеет расплавиться, а расцепитель отключится, т. е. электродвигатель остановится.

Практикой установлено, что если кратность пускового тока: $K_I = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{дл}}}$ каждого из присоединенных к линии приемников не превосходит величину 2,5, то плавкую вставку можно выбирать по длительному расчетному току линии, не считаясь с силой пускового тока, так как при этих условиях плавкая вставка не успеет расплавиться. Следовательно, $I_{\text{н.вст}} \geq I_{\text{дл}}$, т. е. номинальная сила тока плавкой вставки должна быть равна или больше силы длительного расчетного тока линии. Если кратность пускового тока больше 2,5, то номинальный ток плавкой вставки не должен быть меньше $I_{\text{пуск}}$, деленного на 2,5:

$$I_{\text{н.вст}} > \frac{I_{\text{пуск}}}{2,5}. \quad (10.4)$$

Если к питающей линии присоединены несколько асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, то выбирать плавкую вставку для линии надо из двух условий:

- *длительной расчетной нагрузки линии:*

$$I_{\text{н.вст}} > I_{\text{дл}}; \quad (10.5)$$

- *максимального кратковременного тока линии $I_{\text{макс.кр}}$:*

$$I_{\text{н.вст}} > \frac{I_{\text{макс.кр}}}{2,5} = \frac{I_{\text{дл}} + I_{\text{пуск}}}{2,5}. \quad (10.6)$$

Номинальную силу тока плавкой вставки выбирают по наибольшей из этих величин. Необходимо выполнить условия для селективности защиты, т. е. чтобы сначала перегорел ближний к месту аварии предохранитель; для этого надо, чтобы более удаленный предохранитель был на одну-две ступени выше ближайшего к потребителю по силе номинального тока.

Для защиты от перегрузки короткозамкнутых электродвигателей необходимо установить в их цепи автоматы с тепловыми расцепителями или магнитные пускатели с тепловыми реле.

Нагревательный элемент расцепителя или теплового реле не успевает сработать при толчках пусковых токов, поэтому нагревательный элемент теплового расцепителя или теплового реле ($I_{\text{н.тепл}}$) нужно выбирать по длительному расчетному току ($I_{\text{дл}}$), т. е. $I_{\text{н.тепл}} \geq I_{\text{дл}}$.

Силу тока срабатывания расцепителя выбирают равной 125% от силы номинального тока. Допустимые длительные токовые нагрузки на провода, шнуры и кабели с резиновой или пластмассовой изоляцией приводятся в справочниках.

Расчет электрических сетей на потерю напряжения. Согласно ПУЭ отклонение напряжения на зажимах электродвигателей должно быть не более $\pm 5\%$, а в отдельных случаях допускается до $\pm 10\%$. Снижение напряжения у наиболее удаленных ламп должно быть не более 2,5% номинального напряжения ламп, а у наиболее удаленных светильников в жилых зданиях, в сети аварийного и наружного освещения допускается большая потеря напряжения, но не более 5%. Наибольшее напряжение на лампах не должно превышать 105% от номинального напряжения ламп.

В связи с этим каждый участок электрической сети должен быть проверен на потерю напряжения, причем в случае больших расстояний от энергоприемника до источника этот расчет является определяющим.

Для линий постоянного или однофазного переменного тока потеря напряжения ΔU может быть определена по следующей упрощенной формуле:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot P \cdot l}{U \cdot \gamma \cdot S} \text{ В}, \quad (10.7)$$

или

$$\Delta U = \frac{200 \cdot P \cdot l}{U^2 \cdot \gamma \cdot S} \%, \quad (10.8)$$

где P — расчетная мощность, Вт;

l — длина расчетного участка линии, м;

U — напряжение, В;

γ — удельная электрическая проводимость провода, м/(Ом·мм²);

S — сечение провода, мм².

По этим формулам можно с достаточной точностью рассчитать однофазные кабельные и воздушные линии низкого напряжения, если они выполнены медным или алюминиевым проводом (но не стальным). Для линий постоянного тока эти формулы применимы во всех случаях.

Линии трехфазного тока низкого напряжения и относительно небольшой протяженности можно рассчитать по следующей упрощенной формуле (без учета реактивности проводов):

$$\Delta U = \frac{P \cdot l}{U \cdot \gamma \cdot S} \text{ В}, \quad (10.9)$$

или

$$\Delta U = \frac{100 \cdot P \cdot l}{U^2 \cdot \gamma \cdot S} \%, \quad (10.10)$$

Примеры расчета электрических сетей на потерю напряжений.

Пример 1. Определить сечение трехфазной медной воздушной линии ($\gamma = 57 \text{ м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$) для передачи мощности $P=50 \text{ кВт}$, присоединенной в конце линии, если линейное напряжение составляет 380 В , длина линии — 200 м , допустимая потеря напряжения — 5% от $U_{\text{ном}}$ (19 В), а $\cos \varphi = 0,8$.

Решение:

Пользуясь упрощенной формулой (3.9), получим:

$$S = \frac{P \cdot l}{U \cdot \gamma \cdot \Delta U} = \frac{50000 \cdot 200}{380 \cdot 57 \cdot 19} = 24,3 \text{ мм}^2$$

Выбираем провод марки М-25.

Проверка на нагревание:

$$I_p = \frac{50 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 95 \text{ а} .$$

Расчет электрических сетей на экономическую плотность тока. Сети промышленных предприятий с напряжением выше 1000 В при использовании

максимума нагрузки более 4000—5000 ч проверяются по экономической плотности тока в соответствии с данными табл. 10.1.

Таблица 10.1

Предельная экономическая плотность тока

Наименование проводов	Предельная экономическая плотность тока (а/мм ²) при продолжительности использования максимума нагрузки, ч		
	от 1000 до 3000	от 3000 до 5000	от 5000 до 8700
Голые провода и шины:			
медные	2,5	2,0	1,8
алюминиевые	1,3	1,1	1,0
Кабели с бумажной и провода с резиновой изоляцией с жилами:			
медными	3,0	2,5	2,0
алюминиевыми	1,6	1,4	1,2
Кабели с резиновой изоляцией и медными жилами	3,5	3,1	2,7
Кабели с резиновой изоляцией и алюминиевыми жилами	1,9	1,7	1,6

Для изолированных проводов сечением 16 мм² и менее экономическая плотность тока должна быть повышена на 40%.

Таблица 10.2

Допустимые длительные токовые нагрузки на провода и шнуры с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией с медными жилами

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Токовые нагрузки (а) на провода, проложенные					
	открыто	в одной трубе*				
		два одно-ножилых	три одно-жилых	четыре одно-ножилых	один двухжильный	один трех-жильный
0,5	11	—	—	—	—	—
0,75	15	—	—	—	—	—
1	17	16	15	14	15	14
1,5	23	19	17	16	18	15
2,5	30	27	25	25	25	21
4	41	38	35	30	32	27
6	50	46	42	40	40	34
10	80	70	60	50	55	50
16	10	85	80	75	80	70
25	10	115	100	90	10	85
35	70	135	125	115	15	100
50	21	185	170	150	60	135
70	20	225	210	185	19	175
95	30	275	255	225	25	215
120	38	315	290	260	95	0
150	40	360	330	—	—	—
185	10	—	—	—	—	—
240	60	—	—	—	—	—
300	65	—	—	—	—	—
400	30	—	—	—	—	—

* При определении числа проводов, проложенных в одной трубе, нулевой рабочий провод четырехпроводной системы трехфазного тока в расчет не принимается.

Таблица 10.3

Допустимые длительные токовые нагрузки на провода и шнуры с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией с алюминиевыми жилами

Сечение токо- проводящей жи- лы, мм ²	Токовые нагрузки (а) на провода, проложенные			
	открыто	в одной трубе*		
		два одножильных	три одножильных	четыре одножиль- ных
2,5	24	20	19	19
4	32	28	28	23
6	39	36	32	30
10	55	50	47	39
16	80	60	60	55
25	105	85	80	70
35	130	100	95	85
50	165	140	130	120
70	210	175	165	140
95	255	215	200	175
120	295	245	220	200
150	340	275	255	—
185	390	—	—	—
240	465	—	—	—
300	535	—	—	—
400	645	—	—	—

* При определении числа проводов, проложенных в одной трубе, нулевой рабочий провод четырехпроводной системы трехфазного тока в расчет не принимается.

Тема 11. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

11.1. Воздействия электрического тока на человека

Техникой безопасности называется система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих воздействие на работающих опасных производственных факторов. Опасными производственными факторами являются такие факторы, которые приводят людей к травмам или внезапному резкому ухудшению здоровья. Таким образом, техника безопасности обеспечивает безопасность, сохранение здоровья и работоспособности людей в процессе их трудовой деятельности.

Электробезопасность (или защита от поражения электрическим током) – это система организационных и технических мероприятий, технических способов и средств, обеспечивающих безопасные условия труда людей, работающих с технологическим оборудованием и ручным электроинструментом.

В электроустановках опасным производственным фактором является **электрический ток**. **Электроустановкой** называется совокупность аппаратов, машин, линий, вспомогательного оборудования и помещений, предназначенных для производства, преобразования, распределения, накопления и передачи электрической энергии (ЭЭ).

Электрический ток представляет большую опасность для жизни и здоровья людей, так как его (в отличие от других опасностей) нельзя обнаружить дистанционно без соответствующих приборов. Поражение человека электрическим током возможно при замыкании электрической цепи через его тело, что бывает при касании человека в электрической сети в двух точках: при касании непосредственно к двум фазам; при касании к одной фазе, стоя на земле или касаясь еще каких-либо заземленных конструкций; при контакте с нетоковедущими частями оборудования, случайно оказавшимися под напряжением из-за нарушения изоляции проводов электрооборудования. Поражение человека электрическим током происходит главным образом из-за несоблюдения правил техники безопасности (ПТБ), правил устройства и эксплуатации электроустановок (ПУЭ), прикосновения человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением.

Электрический ток, проходя через тело человека, может вызывать:

- **термическое действие** – ожоги отдельных участков тела, нагрев кровеносных сосудов и нервных волокон;
- **электролитическое действие** – разложение крови и других органических жидкостей, нарушая их физико-химический состав;
- **биологическое действие** – раздражение и возбуждение живых тканей организма, что может сопровождаться непроизвольным судорожным сокращением мышц сердца и легких; в результате могут возникать различные нарушения в организме и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и сердца.

Указанные действия электрического тока приводят к двум видам поражения организма человека: электрическим травмам и электрическим ударам.

Электрические травмы (или электротравмы) – это явные или скрытые повреждения в человеке при попадании его под воздействие электрического тока (напряжения). К электротравмам относятся электрические знаки и ожоги.

Электрический знак – это омертвленная кожа в виде мозоли, которая возникает на входе электрического тока в тело человека и на выходе из него. С течением времени (иногда через годы) электрические знаки исчезают.

Ожоги вызывает электрическая дуга, возникающая после прикосновения человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением, при коротких замыканиях, а также сам электрический ток при непосредственном контакте тела человека с токоведущими частями электрооборудования.

Электрический удар – это судорожное сокращение мышц различной степени тяжести (потеря сознания, нарушение дыхания, работы сердца и даже его остановка). Если в течение 5–6 мин удастся восстановить деятельность сердца (искусственное дыхание, непрямой массаж сердца), то можно рассчитывать на возвращение человека к жизни.

Причинами смерти от воздействия электрического тока могут быть прекращение дыхания, а также остановка сердца или его **фибриляция** – быстрые хаотические и одновременные сокращения волокон (фибрилл) сердечной мышцы, при которых сердце перестает работать как насос, в результате чего в организме прекращается кровообращение.

Прекращение дыхания вызывается воздействием электрического тока на мышцы грудной клетки, участвующим в процессе дыхания (возникает удушье по причине недостатка кислорода и избытка углекислоты в организме).

Характер поражения электрическим током и его последствия определяются такими **факторами**, как род и величина тока (постоянный или переменный ток, а при переменном токе – и его частота), величина напряжения, путь и продолжительность протекания тока через тело человека, состояние кожи в местах прикосновения к металлическим частям, физическая и психическое состояние человека.

Наиболее опасен переменный ток частотой 50...60 Гц. Наименее опасными считаются токи до 10 мА и постоянный до 20 мА, так как человек при этих значениях тока может освободиться от токоведущих частей электрооборудования самостоятельно. Токи промышленной частоты и постоянные величиной 0,1 А и более считаются смертельными. При частоте переменного тока в десятки и сотни килогерц его поражающее действие снижается из-за явления поверхностного эффекта, но при очень высоких частотах могут быть ожоги из-за нагревания поверхности тела.

Электрическое сопротивление тела человека состоит из сопротивления кожи и сопротивления внутренних тканей. Наибольшее сопротивление имеет верхний слой кожи (доли миллиметра). Сопротивление тела человека – величина нелинейная, с увеличением прикладываемого напряжения от 10 до 140 В оно резко уменьшается – от 10 кОм до 800 Ом, соответственно увеличивается опасность поражения человека. Сопротивление тела человека уменьшается с увеличением продолжительности воздействия на него тока, площади и плотности контакта с токоведущей частью, а также при неудовлетворительном физическом и психическом состоянии человека. Особенно значительно сопротивление тела человека снижает наличие в нем алкоголя. В расчетах по электробезопасности за наименьшее сопротивление тела человека принимают величину, равную 1000 Ом.

Так как сопротивление тела человека зависит от большого числа факторов, то в технике безопасности объем и характер защитных мероприятий устанавливаются по величине напряжения: переносный электроинструмент, освещение выполняют на 36 и 12 В, электросварку – на 65 В и др.

Понятие **безопасное напряжение** (12, 36 В) является относительным. Бывали случаи со смертельным исходом при напряжении переменного тока 36, 24 и даже 12 В.

Классификация помещений электроустановок по степени опасности поражения электрическим током.

Все электроустановки подразделяют по напряжению на установки до 1000 и свыше 1000 В. Специальным видом электроустановки является **электропомещение** – помещение (или огороженные его части) с находящимся там электрооборудованием, к которому имеет доступ только обслуживающий персонал.

Конкретные организационные и технические меры защиты зависят от класса помещения, напряжения и назначения электроустановки.

Все помещения электроустановок по степени опасности поражения электрическим током делятся на 3 класса:

1) **повышенной опасности** – помещения, характеризующиеся наличием одного из следующих условий:

- сырость (относительная влажность более 75 %);
- токопроводящая пыль;
- токопроводящие полы (металлические, кирпичные, земляные и т.д.);
- высокая температура (выше +35 °С);
- возможность одновременного прикосновения человека к металлическим частям, имеющим соединение с землей, и к металлическим корпусам электрооборудования, которые могут оказаться под напряжением при повреждении изоляции;

2) **особо опасные** – помещения, характеризующиеся наличием одного из следующих условий:

- большая сырость (относительная влажность близка к 100 %);
- химически активная или органическая среда;
- два или более условий повышенной опасности (например, сырость и токопроводящий пол);

1) **без повышенной опасности** – помещения, в которых отсутствуют условия, которые создают повышенную или особую опасность (перечислены выше).

11.2. Системы электропитания потребителей в шахте

Питание трехфазных электроприемников может осуществляться по двум системам: 1) с заземленной нейтралью (рис. 11.1, а) и 2) с изолированной нейтралью (рис. 11.1, б). Основными факторами, определяющими выбор конкретной системы питания электроприемников в подземных выработках шахт, опасных по газу или пыли, являются: 1) **повышенная опасность поражения электрическим током** и 2) **опасность возникновения пожаров и взрывов в результате открытого искрения**.

Повышенная опасность поражения электрическим током в подземных выработках связана с большой влажностью, наличием токопроводящей пыли и усиленным потовыделением у шахтеров.

Чрезвычайно опасно для жизни человека прохождение тока 0,1 А в течение 0,2 с. Ток зависит от приложенного напряжения – *напряжения прикосновения* и *сопротивления тела человека*, определяемого в основном состоянием его кожи. Сухая кожа имеет высокое сопротивление, а влажная очень низкое. При определении безопасного напряжения для человека, выполняющего тяжелую работу и находящегося в условиях влажной шахтной атмосферы, сопротивление его тела принимают равным 1000 Ом ($R_{ч} = 1000 \text{ Ом}$). При допустимом токе 30 мА допустимое напряжение прикосновения $U_{пр.доп} = 0,03 \cdot 1000 = 30 \text{ В}$.

Поражение электрическим током происходит в основном в случае прикосновения человека к одной фазе сети или к корпусу электрооборудования, соединяющегося с фазой в результате повреждения изоляции.

Если нейтраль системы питания заземлена (рис. 11.1, а), то прикоснувшийся к фазе человек оказывается под фазным напряжением, т.е. под напряжением 380 В (в сети с линейным напряжением 660 В). Это напряжение является очень опасным, так как по человеку проходит ток 0,38 А.

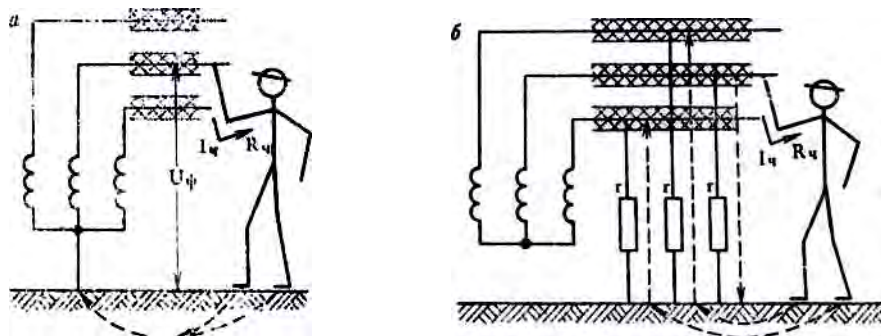


Рис. 11.1. Цепь тока через человека при касании одной фазы: а – в сети с заземленной нейтралью; б – в сети с изолированной нейтралью

В системе с изолированной нейтралью (рис. 11.1, б) ток через человека будет зависеть не только от напряжения сети и сопротивления человека, но и от сопротивления изоляции двух других фаз относительно земли. В предельном случае, когда сопротивление изоляции одной из фаз равно нулю (к.з. фазы на землю), человек будет находиться под линейным напряжением сети. Но при достаточно высоком сопротивлении изоляции и малой емкости сети в случае касания одной фазы через человека будет проходить безопасный для него ток. Таким образом, если контролировать сопротивление изоляции фаз и автоматически отключать сеть при снижении сопротивления изоляции ниже установленного допустимого значения, система с изолированной нейтралью получается более безопасной в отношении поражения электрическим током, чем система с заземленной нейтралью.

В отношении пожаров и взрывов система с изолированной нейтралью при контроле сопротивления изоляции фаз также более безопасна, поскольку в системе с заземленной нейтралью замыкание на землю представляет собой однофазное к.з., которое всегда сопровождается появлением открытого искрения. **Поэтому в шахте запрещено применять сети с глухозаземленной нейтралью трансформатора (по правилам ТБ).**

11.3. Основные мероприятия по повышению электробезопасности

Способы и средства обеспечения электробезопасности. Электробезопасность людей обеспечивается конструкцией электроустановок, организационными и техническими мероприятиями, а также техническими способами, средствами и приспособлениями.

Требования электробезопасности к конструкции электроустановок устанавливаются нормативными документами (стандартами, правилами, нормами).

Организационные мероприятия включают в себя: требования к персоналу (возраст, медицинское освидетельствование, обучение, проверка знаний); назначение лиц, ответственных за организацию и производство работ; оформление наряда (распоряжения) на производство работ; организацию надзора во время производства работ и др.).

Технические мероприятия (со снятием напряжения) – это отключение установки (или части ее) от источника; запирающие приводы отключающих коммутационных аппаратов; снятие предохранителей; отсоединение концов питающих линий; установка знаков безопасности и ограждений) наложение заземления и др. Технические мероприятия при проведении работ под напряжением включают в себя применение изолирующих, ограждающих и вспомогательных защитных средств.

Для электрозащиты при эксплуатации различного оборудования применяются ряд технических методов (способов), основными из которых являются: использование малых напряжений; электрическое разделение сетей; защитное заземление и зануление; устройства защитного отключения (УЗО) и др.

Для электропитания переносных установок и электроинструмента (электродрели, гайковерты, электрические паяльники и др.) допускаются следующие максимальные значения напряжения в зависимости от места работы:

- 220 В (50 Гц) в помещениях без признаков повышенной и особой опасности поражения электрическим током;
- 42 В – в помещениях с повышенной опасностью поражения током и при работе в наружных условиях (допускается использовать инструмент до 220 В, но с обязательным применением основных и дополнительных защитных средств);
- 42 В – в помещениях особо опасных с обязательным применением основных и дополнительных защитных изолирующих средств.

Для питания переносных светильников допускается использовать 42 В - в помещениях с повышенной опасностью и 12 В – в особо опасных и неблагоприятных условиях.

Защитное зануление. В системе с глухозаземленной нейтралью (рис. 11.2) все металлические нетоковедущие части электроустановок соединяют электрически с заземленной нейтралью трансформатора через **нулевой провод сети** (или через специальный заземляющий проводник). Такое соединение называется **защитным занулением**. Здесь при пробое изоляции на корпус электроприемника возникает ток короткого замыкания $I_{к.з.}$, что приводит к срабатыванию защитного аппарата и отключению поврежденного участка.

Простое заземление корпуса электроприемника без соединения с нейтралью правилами запрещается, так как такое защитное заземление не обеспечивает надежной защиты (при пробое изоляции ток $I_{к.з.}$ ограничивается сопротивлениями

двух заземлителей – электроприемника r_3 и нейтрали r_0 – и может оказаться недостаточным для срабатывания защиты, а на корпусе поврежденного электроприемника может быть опасное напряжение).

Если одновременно соединить корпус электроприемника с нейтралью и заземлить его, то это не нарушит действия защиты и улучшит условия безопасности (при замыкании на корпус дополнительное заземление уменьшит напряжение на аварийном корпусе). Такое дополнительное заземление называется **повторным заземлением нулевого провода**. Правила предписывают устраивать повторные заземления нулевого провода на воздушных линиях через каждые 250 м, а также на концах линий и ответвлений длиной более 200 м.

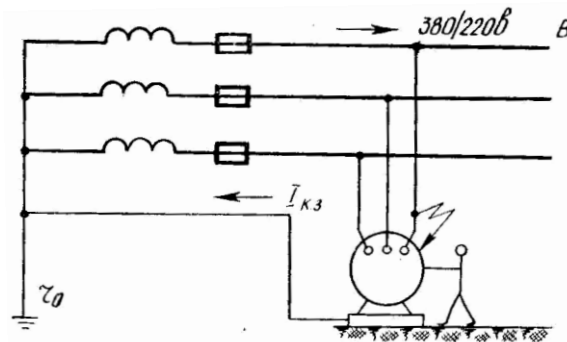


Рис. 11.2. Зануление корпуса электроприемника в сети с глухозаземленной нейтралью

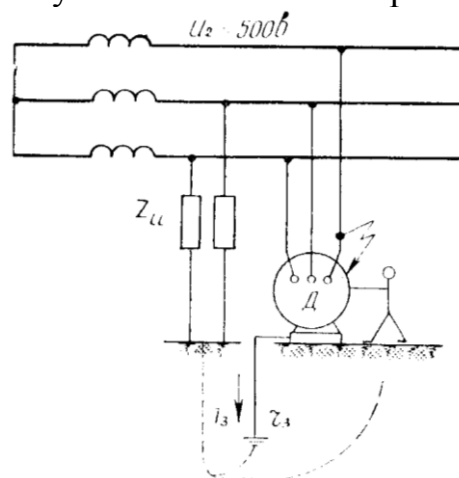


Рис. 11.3. Заземление корпуса электроприемника в сети с изолированной нейтралью

Защитное заземление. Одним из видов защиты от поражения электрическим током в системах с изолированной нейтралью является устройство **защитных заземлений** – преднамеренное электрическое соединение с заземляющим устройством металлических нетоковедущих частей электрооборудования, которые могут оказаться под напряжением. *Основные элементы заземляющего устройства:* **заземлитель** (металлические проводники, имеющие непосредственный контакт с землей) и **заземляющие проводники**, соединяющие заземляемые элементы электрооборудования с заземлителем.

Основная задача защитного заземления – снизить до безопасной величины (не более 30 - 40 В) напряжение, возникающее на нетоковедущих металлических частях электроустановок при пробое изоляции. При этом для тока, проходящего от аппарата с поврежденной изоляцией в землю, создается путь с малым сопротивлением, так что через человека пойдет незначительная часть тока утечки.

В установках с изолированной нейтралью (рис. 11.3) при пробое изоляции на корпус электродвигателя D он окажется под напряжением, величина которого равна падению напряжения на сопротивлении заземления r_3 от протекающего через него тока I_3 . Этот ток определяется линейным напряжением U_2 и полным сопротивлением изоляции проводов Z_n . **При нормальном сопротивлении изоляции ток I_3 небольшой, напряжение на корпусе электродвигателя при пробое изоляции мало и прикосновение к нему человека мало опасно.** Но допускать длительное замыкание на землю нельзя, так как фазное напряжение исправных фаз по отношению к земле возрастает до линейного, что способствует возникновению второго замыкания на землю в другой фазе. А двойное замыкание на землю создает большую опасность для человека.

Более совершенной мерой защиты является *защитное отключение*, так как защитные заземление и зануление иногда не защищают человека от поражения электрическим током: в сетях с изолированной нейтралью однофазные замыкания не отключаются при системе заземления, а в сетях с глухозаземленной нейтралью хотя и отключаются, но время их отключения может быть велико (десятки секунд) при малых токах короткого замыкания и завышенных токах плавной вставки предохранителей.

Защитное отключение. *Защитным отключением* называется система защиты, которая обеспечивает безопасность путем быстрого действующего отключения аварийного участка или сети в целом при возникновении замыкания на корпус или непосредственно на землю с временем действия 0,1...0,2 с и ниже. Наиболее совершенные системы защитного отключения срабатывают также и при прикосновении человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением.

Области применения защитного отключения:

- в передвижных электроустановках напряжением до 1000 В и в ручном электрофицированном инструменте;
- дополнительно к защитному занулению для отключения электрооборудования, находящегося на больших расстояниях от пункта электроснабжения;
- если невозможно выполнить необходимое заземление в скальных, многолетнемерзлых грунтах и т.п.

Принцип выполнения защитного отключения зависит от типа входного сигнала, поступающего на датчик (реле максимального тока или реле напряжения – основной элемент схемы). Замыкание фазы электрической сети на землю или снижение изоляции приводит к несимметрии трехфазных токов и напряжений, а на корпусе поврежденного элемента появляется напряжение относительно земли. Токи короткого замыкания, напряжения или их несимметрия действуют на соответствующие датчики, которые отключают коммутационный аппарат в цепи питания аварийного участка.

На рис. 11.4 приведена схема аппарата защитного отключения и контроля изоляции для сетей с изолированной нейтралью напряжением до 380 В типа НРР – Н51. Принцип действия схемы аналогичен работе асимметра (см. рис. 11.5, б).

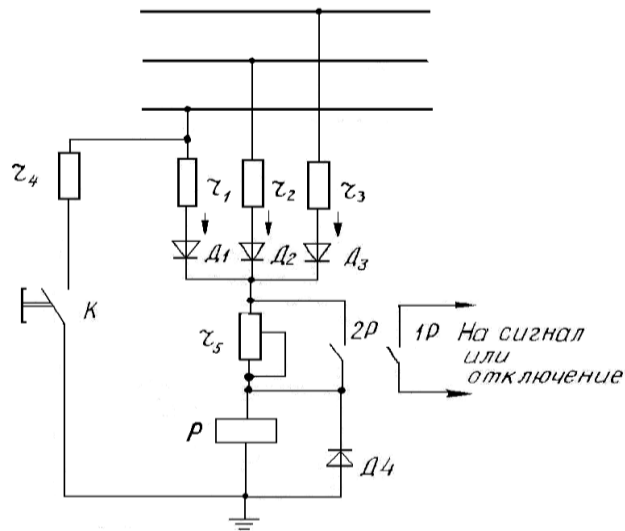


Рис. 11.4. Схема аппарата защитного отключения и контроля изоляции для сетей с изолированной нейтралью

Реле Р включено в нулевую цепь выпрямительного моста на диодах Д1 – Д3. Сопротивления r_1 , r_2 , r_3 служат для ограничения тока в случае пробоя одного из диодов или междуфазного короткого замыкания. Переменное сопротивление r_5 предназначено для регулирования чувствительности по сопротивлению изоляции.

В нормальных условиях через нулевую цепь протекает небольшой ток небаланса постоянного напряжения, недостаточный для срабатывания реле. При снижении сопротивления изоляции в фазах сети через обмотку реле будет протекать дополнительный выпрямленный ток, величина которого зависит от сопротивлений изоляции фаз и величины сопротивления r_5 . При определенной величине тока реле Р работает и замкнет цепь отключения 1Р. Реле срабатывает и при прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением, так как происходит снижение изоляции фазы, к которой прикоснулся человек.

Вторые контакты 2Р шунтируют сопротивление r_5 , что позволяет избежать подгорания контактов реле при неустойчивых замыканиях на землю.

Проверка действия защиты производится кнопкой К. При срабатывании реле отключается вся сеть, питающаяся от трансформатора.

Устройство защитного отключения (УЗО) является высокоэффективным электрозачитным средством. Обычно УЗО совмещают с автоматическими выключателями (например УЗО на 220 и 380 В Гомельского завода «Электроаппаратура», УЗО типа ВАД2 Московского концерна «Энергомер»).

В подземных выработках шахт с помощью непрерывного соединения металлических оболочек всех кабелей устраивают общую сеть заземления, к которой присоединяют объекты, подлежащие заземлению, а сама сеть заземления подсоединяется к главным и местным заземлителям, располагаемым в местах, где переходное сопротивление с электрода в почву является наименьшим.

Главные заземлители (в зумпфе и водосборнике) и местные заземлители в выработках выполняют из стальных листов или из стальных труб, забиваемых в

шпур, который регулярно увлажняется. Заземляющие проводники выполняют из стальной полосы или из стального троса.

Общее переходное сопротивление сети заземления у самых отдаленных заземлителей должно быть не менее 2 Ом.

Измерение сопротивления шахтных заземлителей производится с помощью приборов ИЗШ-59, М1103 и МС-07.

Для защиты от поражения электрическим током используются также следующие методы:

1. *Применение пониженного напряжения.* Это относится к ручному инструменту, к сигнальным и осветительным установкам.
2. *Защита от случайного прикосновения к токоведущим частям с помощью различных блокировочных устройств,* препятствующих открыванию крышек электрических аппаратов, если предварительно не отключено напряжение.
3. *Применение защитных средств* (резиновые перчатки, боты, коврики, деревянные решетки на изоляторах и др.).

Для непрерывного контроля состояния изоляции в сетях до 1000 В можно использовать простые схемы, приведенные на рис. 11.5. В качестве индикаторов КИ можно применять **высокоомные вольтметры**, а лучше – **электронные или газоразрядные лампы**. Когда изоляция сети исправна, токи, протекающие через индикаторы КИ или через конденсатор *К* асимметра, равны друг другу, а их сумма в нулевой точке равна нулю. Поэтому индикаторы дают одинаковые показания (или лампы светятся одинаково ярко), а в схеме 11.5, б ток по обмотке реле *P* будет равен нулю. При пробое изоляции на землю соединенная с поврежденной фазой лампа гаснет (или вольтметр показывает нуль), а в схеме асимметра по обмотке реле *P* потечет ток, реле сработает и своим размыкающим контактом подаст сигнал дежурному или команду на отключение поврежденного участка. Если сопротивление изоляции одной из фаз резко уменьшилось и ей угрожает пробой, то вольтметры в схеме рис. 11.5, а будут давать различные показания.

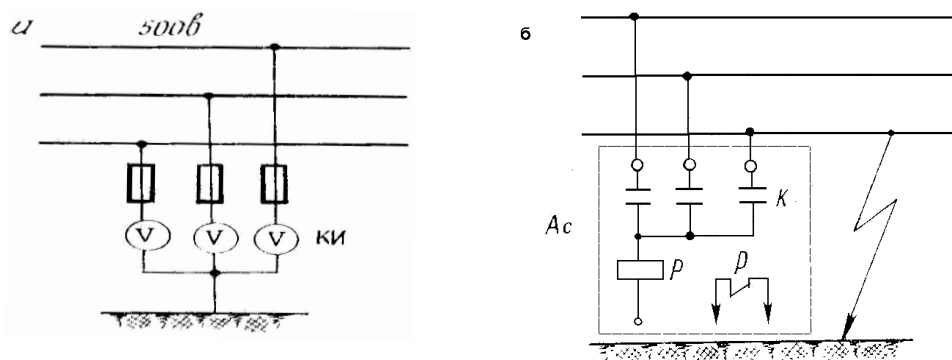


Рис. 11.5. Схемы включения приборов контроля изоляции:

а – схема включения ламп или вольтметров;

б – схема включения асимметра

Асимметры типа РА-74/2 (см. рис. 11.5, б) предназначены для защитного отключения в электроустановках напряжением 500 В при однофазных замыканиях на землю. В последние годы появились более совершенные приборы контроля изоляции и защитного отключения на основе вентильных схем.

На предприятиях горной промышленности состояние изоляции в сетях с напряжением 380 и 660 В контролируется устройствами автоматического контроля изоляции УАКИ-380, УАКИ-660 и аппаратами АЗАК-380, АЗАК-660, а в сетях 127 и 220 В – реле утечки РУ-127/220.

На рис. 11.6 показана электрическая схема УАКИ-660. В устройстве используется двухобмоточное реле K постоянного тока, по обеим обмоткам которого проходит вспомогательный ток $I_{в}$. Обмотки включены встречно и число витков их подобрано так, что при отсутствии утечки суммарная м.д.с. обеих обмоток равна нулю и реле не включено. По мере снижения сопротивления изоляции ток утечки $I_{ут}$ увеличивается. При этом возрастает и оперативный ток, проходящий по обмотке 11, а ток через стабилитрон уменьшается.

Когда сопротивление трехфазной утечки станет меньше 30 кОм, а при однофазной утечке меньше 11 – 14 кОм, разность м.д.с. обмоток реле K достигнет значения м.д.с. срабатывания и реле K включится. Своим замыкающим контактом $K.1$ оно отключит автоматический выключатель, который снимет напряжение с защищаемого участка сети.

Для компенсации емкостных токов утечки шахтной схемы в схемах устройств УАКИ применен компенсирующий дроссель, который присоединяется между землей и нейтралью емкостного фильтра $C2, C3, C4$, подключенного к трем фазам сети. Это позволяет значительно уменьшить токи, проходящие через прикоснувшегося к сети человека.

Проверка исправности устройств АКИ производится с помощью кнопки SB , при нажатии которой создается однофазная утечка. Такая проверка должна производиться перед началом каждой смены (в соответствии с правилами ТБ).

Приблизительно сопротивление изоляции может быть определено по показаниям килоомметра, встроенного в УАКИ.

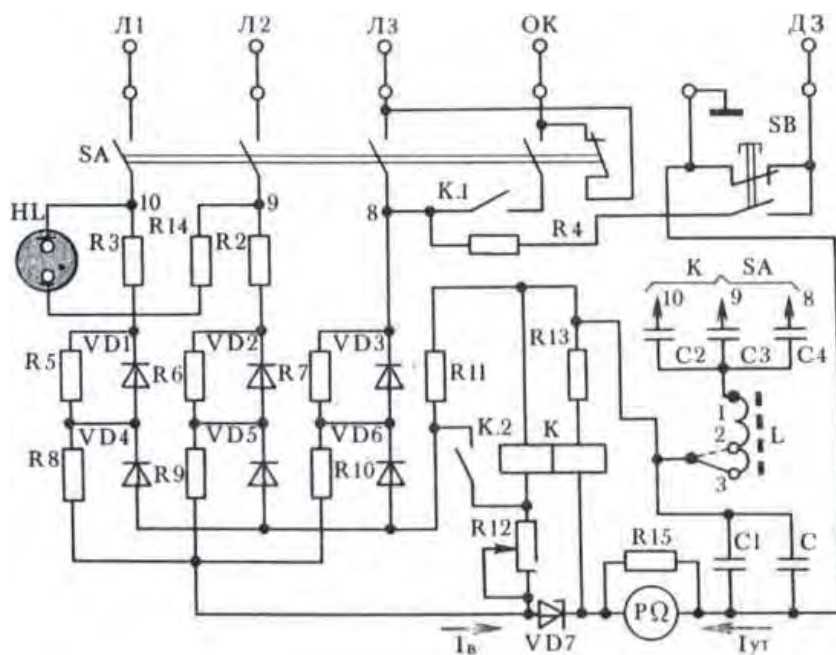


Рис. 11.6. Принципиальная электрическая схема УАКИ-660

11.4. Особенности схем дистанционного управления шахтными передвижными механизмами

Схемы дистанционного управления передвижными машинами и механизмами отличаются от схем управления стационарными машинами тем, что на передвижных машинах размещаются и двигатель 4 (рис. 11.7, а), и кнопочный пост управления 3, а пускатель 1 находится в штреке на расстоянии в несколько десятков метров. При этом пускатель и машина соединены между собой одним гибким шахтным кабелем 2 с ограниченным числом вспомогательных жил.

В некоторых передвижных машинах с многодвигательным приводом (проходческих комбайнах, погрузочных машинах) включение двигателей 4 (рис. 11.7, б) производится с помощью контакторов и кнопочных постов, расположенных в станции управления 3, которая размещается на самой машине. Электроэнергия на станцию управления подается по гибкому кабелю 2 от общего пускателя 1 на штреке, управляемого дистанционно (с машины) по вспомогательным жилам гибкого кабеля, т.е. как в схеме на рис. 11.7, а. Некоторые из указанных машин дополнительно оборудуются вынесенным переносным пультом дистанционного управления 5, соединенным со станцией управления гибким контрольным многожильным кабелем 6.

Другая особенность дистанционного управления связана с заземлением передвижных машин по одной из жил (заземляющей) того же кабеля, по которому производится питание и управление машиной. При этом согласно ПБ в схеме управления пускателями, подающими напряжение на передвижные машины, ***должен быть предусмотрен автоматический контроль их заземления.*** Схемы дистанционного управления передвижными машинами должны обеспечивать также ***защиту от потери управляемости, т.е. исключать возможность самовключения пускателя (обеспечивать так называемую нулевую защиту) и невозможность включения кнопкой «Пуск» отключенного пускателя при любом повреждении жил управления гибкого кабеля.***

В настоящее время схемы управления всех рудничных пускателей содержат промежуточное реле, включенное параллельно вторичной обмотке трансформатора и нечувствительное к переменному току, а также встроенный в кнопочный пост полупроводниковый диод. Для автоматического контроля заземления передвижной машины заземляющая жила используется как один из проводов цепи управления. При этом во избежание появления открытого искрения, способного вызвать взрыв метано-воздушной среды, цепь управления выполняется искробезопасной. Дистанционное управление может осуществляться по трехпроводной (рис. 11.8, а) или двухпроводной (рис. 11.8, б) схеме. Рассмотрим работу этих схем и обеспечение ими *защиты от потери управляемости.*

В трехпроводной схеме (см. рис. 11.8, а) пока кнопка "Пуск" не нажата, катушка промежуточного реле K обтекается переменным током от вторичной обмотки трансформатора $T2$ и реле K отключено. При нажатии кнопки "Пуск" по катушке реле K будет проходить выпрямленный ток, постоянная составляющая которого достаточна для включения реле K . Замыкающий контакт $K.1$ промежуточного реле K включит пускатель KM , главные контакты которого подадут напряжение на двигатель (на схеме включение двигателя не показано), а замыкающий

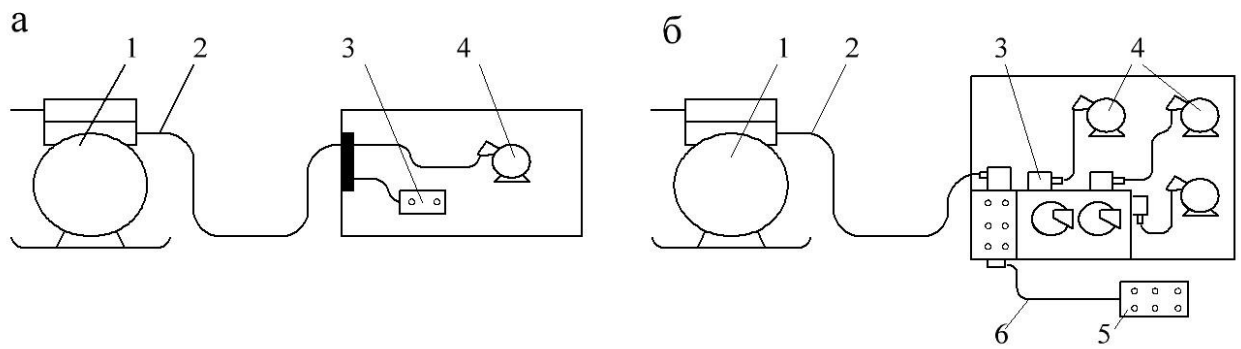


Рис. 11.7. Схемы размещения аппаратуры дистанционного управления передвижными машинами

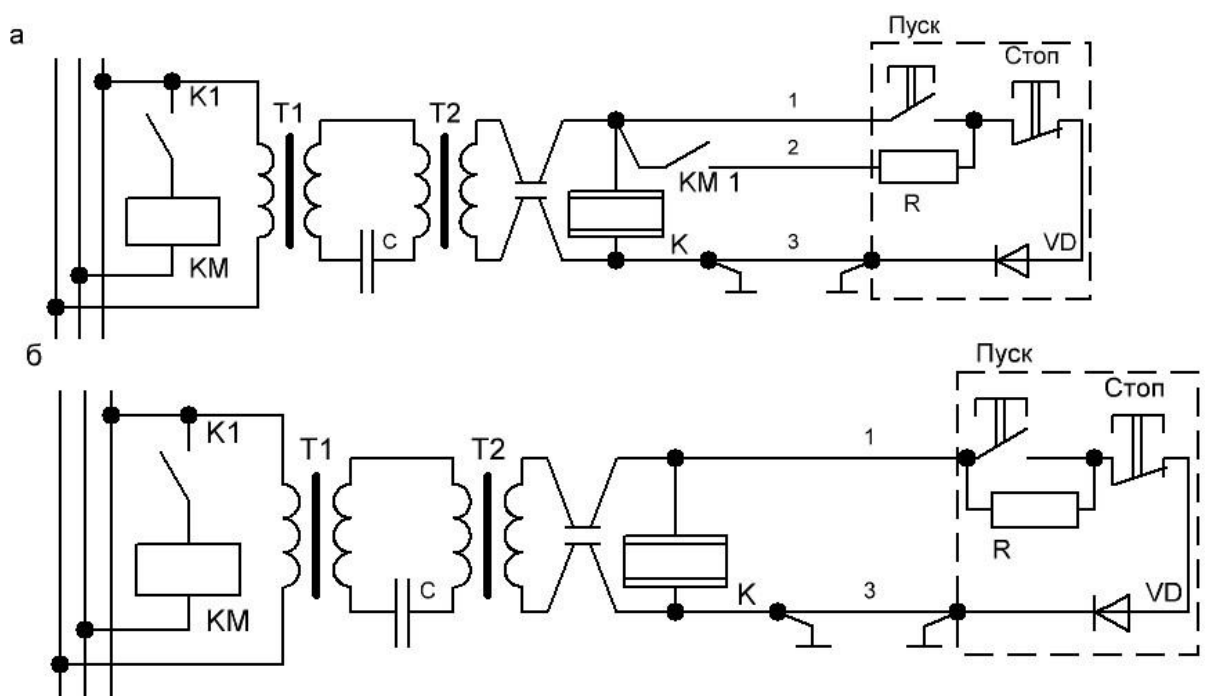


Рис. 11.8. Трехпроводная (а) и двухпроводная (б) схемы дистанционного управления передвижными машинами

вспомогательный контакт $KM.1$ магнитного пускателя осуществляет самоблокировку пускателя через резистор R после отпускания кнопки «Пуск». Постоянная составляющая выпрямленного тока при этом уменьшается, но остается все же достаточной, чтобы реле не отключалось. Заземляющая жила (провод 3) является токоведущей в цепи управления. При обрыве заземляющей жилы диод VD перестанет шунтировать реле K , оно отключится и отключит пускатель. Оперативное отключение пускателя производят нажатием кнопки «Стоп».

Рассмотрим влияние возможных повреждений кабеля на работу схемы дистанционного управления. При обрыве провода 1 пускатель не включается, а при обрыве проводов 2 или 3 включенный пускатель отключается. В случае замыкания проводов 1 и 2 трехпроводная схема превращается, по существу, в

двухпроводную. При замыкании проводов 2 и 3 или 1 и 3 катушка реле K оказывается зашунтированной накоротко в течение обоих полупериодов, в результате чего включенный пускатель отключится, а новое включение пускателя станет невозможным.

В двухпроводной схеме (см. рис. 11.8, б) кнопка "Пуск" зашунтирована резистором R , сопротивление которого принимается таким, чтобы постоянная составляющая выпрямленного тока при разомкнутой кнопке "Пуск" была недостаточна для включения реле K , но достаточна для его удержания во включенном положении. Эта схема, как и трехпроводная, обеспечивает автоматический контроль целостности заземляющей жилы и защиту от потери управляемости. Но недостатком (по сравнению со схемой, показанной на рис. 11.8, а) является возможность самовключения пускателя при повышении напряжения в сети. Этот недостаток устраняется применением для цепи управления стабилизированного трансформатора $T2$.

11.5. Средства защиты работающих в электроустановках

Средствами защиты называются средства, использование которых предотвращает или уменьшает воздействие на работающих опасных или вредных производственных факторов.

Электрозащитные средства предназначены для защиты людей от поражения электрическим током, воздействия электрической дуги и электромагнитного поля. К электрозащитным средствам относят:

- изолирующие штанги (оперативные, для наложения заземления, измерительные), изолирующие клещи, электроизмерительные указатели напряжения для фазировки;
- изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ под напряжением свыше 1000 В и слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками для работы в электроустановках напряжением до 1000 В;
- диэлектрические перчатки, боты, галоши, коврики, изолирующие накладки и подставки;
- индивидуальные изолирующие комплекты;
- переносные заземления;
- оградительные устройства и диэлектрические колпаки;
- плакаты и знаки безопасности.

Изолирующие штанги выполняют из прочного и высококачественного диэлектрика. Они состоят из изолированной части, ограничительного кольца и ручки.

Изолирующие клещи состоят из двух частей, каждая из которых имеет изолированную рабочую губку, ограничительное кольцо и ручку-захват.

Токоизмерительные клещи представляют собой переносный трансформатор тока с разъемным сердечником, вторичной обмоткой и амперметром.

Указатель напряжения выше 1000 В – это изолирующая штанга с индикатором напряжения (неоновой лампой или светодиодом). Для напряжения до 500 В используют указатели (токоискатели) типа ТИ-2, УНН-90 или МИН-1 с неоновой лампой в качестве индикатора.

Резиновые диэлектрические перчатки, боты, галоши и коврики изготавливают из высококачественной технической резины.

Изолирующая подставка – деревянный настил размером 0,5 × 0,5 м на опорных изоляторах. Используется для дополнительной изоляции при операциях с предохранителями, разъединителями и т.д.

Изолирующие рукоятки слесарно-монтажного инструмента должны иметь ограничительный упор и гладкое изоляционное покрытие длиной не менее 10 см.

При работах в электроустановках могут применяться также **средства индивидуальной защиты**: очки, каски, противогазы, рукавицы, предохранительные пояса и страховочные канаты.

Электрозащитные средства разделяют на основные и дополнительные.

Основные – это электрозащитные средства, изоляция которых длительное время выдерживает рабочее напряжение электроустановок и которые позволяют прикасаться к токоведущим частям, находящимся под напряжением. Поэтому их изготавливают из материалов с устойчивой диэлектрической характеристикой (пластмасса, бакелит, фарфор, эбонит, гетинакс и т.п.).

Дополнительными называются средства для защиты от напряжения прикосновения и напряжения шага, которые при данном напряжении сами не могут обеспечить защиту от поражения током, а применяются вместе с основными электрозащитными средствами.

Классификация электрозащитных средств приведена в таблице 11.1.

Таблица 11.1-Электрозащитные средства

Вид электрозащитных средств	Электрозащитные средства, используемые при напряжении электроустановки до 1000 В	Электрозащитные средства, используемые при напряжении электроустановки свыше 1000 В
Основные	Изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажные инструмент с изолирующими рукоятками, указатели напряжения	Изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения и приспособления для ремонтных работ: изолирующие лестницы, площадки, тяги, канаты, корзины телескопических вышек и др.
Дополнительные	Диэлектрические галоши, диэлектрические коврики, изолирующие подставки и накладки, переносные заземления	Диэлектрические перчатки, боты, коврики, индивидуальные экранирующие комплекты, изолирующие подставки и накладки, диэлектрические колпаки, переносные заземления, оградительные устройства, плакаты и знаки безопасности

ЛИТЕРАТУРА

1. Фираго, Б.И. Теория электропривода / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2007.
2. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981.
3. Харизоменов, И.В. Электрооборудование и электроавтоматика металлорежущих станков / И.В. Харизоменов. – М.: Машиностроение, 1975.
4. Сандлер, А.С. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков / А.С. Сандлер. – М.: Высшая школа, 1972.
5. Фираго, Б.И. Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов. – Минск: Техноперспектива, 2012.
6. Фотиев, М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических цехов. – М.: Металлургия, 1990.
7. Плащанский Л.А. «Основы электроснабжения горных предприятий», 2006 г.
8. http://mitia13.narod.ru/obr/obr_008.html «Электроснабжение горных предприятий» (14.02.17).
9. <http://www.motor-reмонт.ru/books/3/> «Справочник молодого электротехника» (21.03.17).
10. Хошмухамедов И.М., Пичуев А.В. «Монтаж, наладка и эксплуатация горного электрооборудования», 2006 г.
11. Москаленко, В.В. Электрический привод / В.В. Москаленко. – М.: Высш. школа, 1991.
12. Мирский М.И. Горная электротехника и основы рудничной автоматики. – М.:Недра, 1982.