

В. В. МОСКАЛЕНКО

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

*Допущено*

*Министерством образования Российской Федерации  
в качестве учебного пособия для студентов учреждений  
среднего профессионального образования, обучающихся  
по группе специальностей 1800 «Электротехника»*

УДК 621.315

ББК 31.291

М 82

**Рецензенты:**

ученый секретарь АООТ «Электропривод»,  
д-р техн. наук, профессор *М. Г. Юньков*;  
преподаватель электротехн. дисциплин Московского  
политехнического колледжа *О. П. Лавренцова*

**Москаленко В. В.**

М 82 Электрический привод: Учеб. пособие для студ. учреждений  
сред. проф. образования – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. –  
368 с.

ISBN 5-294-00032-6 (Мастерство)

ISBN 5-06-003904-8 (Высшая школа)

Изложены основы теории автоматизированного электропривода. Рассмотрены назначение и функции электроприводов постоянного и переменного тока, их схемы, характеристики, режимы работы, регулировочные свойства, особенности пуска и торможения электродвигателей. Описаны элементная база и реализация разомкнутых и замкнутых схем управления электропривода с релейно-контакторными аппаратами и полупроводниковыми преобразователями и устройствами. Изложены вопросы энергетики работы электропривода, основы его проектирования, приведены примеры решений типовых практических задач.

Может быть полезно студентам вузов.

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
издательства «Мастерство» и его воспроизведение любым способом  
без согласия издательства запрещается.*

УДК 621.315

ББК31.291

ISBN 5-294-00032-6

ISBN 5-06-003904-8

© Москаленко В. В., 2000

© Издательство «Мастерство», 2000

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрический привод (ЭП) представляет собой электромеханическую систему, обеспечивающую реализацию различных технологических и производственных процессов в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, коммунальном хозяйстве и в быту с использованием механической энергии. Назначение ЭП состоит в обеспечении движения исполнительных органов рабочих машин и механизмов и управлении этим движением. Другими словами, ЭП, являясь энергетической основой реализации технологических и производственных процессов, во многом определяет их качество, энергетические и технико-экономические показатели.

Научно-технический прогресс, автоматизация и комплексная механизация технологических и производственных процессов определяют постоянное совершенствование и развитие современного ЭП. В первую очередь это относится ко все более широкому внедрению автоматизированных ЭП с использованием разнообразных полупроводниковых силовых преобразователей и микропроцессорных средств управления. Постоянно появляются и новые типы электрических машин и аппаратов, датчиков координат переменных и других компонент, применяемых в ЭП.

Расширение и усложнение выполняемых ЭП функций, использование в них новых элементов и устройств, все более широкое включение ЭП в системы автоматизации технологических процессов требуют высокого уровня подготовки специалистов, занимающихся их проектированием, монтажом, наладкой и эксплуатацией. Они должны хорошо разбираться в основных физических процессах, протекающих в ЭП, знать назначение, устройство, принцип действия, свойства и характеристики их компонент, разбираться в схемах управления ЭП и уметь выбирать их элементы, а также определять технико-экономические показатели работы ЭП.

Книга написана в соответствии с примерной программой дисциплины «Электрический привод», изучение которой предусмотрено учебным планом специальностей 1801 «Электрические машины и аппараты», 1802 «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника» и 1806 «Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт электрического и электромеханического оборудования» среднего профессионального образования. В ней рассмотре-

ны вопросы механики ЭП и общие принципы их построения, схемы, характеристики, регулировочные свойства ЭП с двигателями постоянного и переменного тока, способы пуска и торможения двигателей, выбора и проверки их по нагреву, методы расчета основных энергетических показателей работы, а также основные элементы разомкнутых и замкнутых схем управления ЭП, их типовые узлы и примеры выполнения.

Изучение дисциплины «Электрический привод» основывается на знаниях учащихся по физике, математике, теоретическим основам электротехники, электронике, автоматике, электрическим машинам и аппаратам, микропроцессорной технике.

Для закрепления изучаемого материала и лучшего его практического усвоения книга снабжена примерами расчетов, которые отмечены звездочками, и задачами для самостоятельного решения. В конце каждой главы приведены контрольные вопросы, которые помогут учащемуся самостоятельно проверить степень усвоения материала.

Автор выражает благодарность И. А. Москаленко за помощь при подготовке рукописи к изданию.

Отзывы и пожелания автор просит направлять по адресу: 105043 г. Москва, ул. 8-я Парковая, д. 25, «Издательство «Мастерство».

## ВВЕДЕНИЕ

В современном промышленном и сельскохозяйственном производстве, на транспорте, в строительстве и коммунальном хозяйстве, в быту применяются самые разнообразные технологические процессы, для реализации которых человеком созданы тысячи различных машин и механизмов. С помощью этих рабочих машин и механизмов осуществляется добыча полезных ископаемых, обрабатываются различные материалы и изделия, перемещаются люди, предметы труда, жидкости, газ и реализуются многие другие процессы, необходимые для жизнеобеспечения человека. Так, добыча полезных ископаемых ведется с помощью экскаваторов, буровых установок и угольных комбайнов, детали и материалы обрабатываются на разнообразных станках, люди и изделия перемещаются транспортными средствами, лифтами и эскалаторами, жидкости и газы транспортируются с помощью насосов и вентиляторов.

Рабочая машина или производственный механизм состоит из множества взаимосвязанных деталей и узлов, один из которых непосредственно выполняет заданный технологический процесс или операцию и поэтому называется исполнительным органом (ИО). В лифтах – это кабина, в экскаваторах – ковш, у вентиляторов и насосов – рабочее колесо (крыльчатка). Отметим при этом одно очень важное обстоятельство – все названные технологические процессы осуществляются за счет механического движения ИО рабочих машин и механизмов.

Характерным для многих рабочих машин является наличие не одного, а двух или даже нескольких взаимодействующих ИО. Например, при обработке на токарном станке деталь вращается вокруг своей оси, при этом резец, перемещаясь вдоль детали, снимает с нее слой металла – стружку. В этом случае вращение детали осуществляет шпиндель станка (первый исполнительный орган), а поступательно перемещает резец механизм подачи станка (второй исполнительный орган).

Во многих технологических процессах требуется управлять движением ИО – регулировать скорость движения и ее направление, точно осуществлять остановку в заданной позиции, ограничивать ускорение движения. Такое регулирование необходимо в лифтах, прокатных станах, транспортерах, многих станках и др.

Исполнительный орган в процессе выполнения заданной операции должен преодолевать сопротивление своему движению, обусловленное наличием трения или притяжения Земли, упругой и пластической деформациями веществ или другими факторами. Для этого к нему необходимо подвести механическую энергию от устройства, которое в соответствии со своим назначением получило название привода.

Механическая энергия вырабатывается приводом, который преобразовывает другие виды энергии. В зависимости от вида используемой первичной энергии различают гидравлический, пневматический, тепловой и электрический приводы. В современном промышленном производстве, коммунальном хозяйстве и в быту наибольшее применение нашел электрический привод (ЭП), на долю которого приходится более 60% потребляемой в стране электроэнергии.

Такое широкое применение ЭП объясняется целым рядом его преимуществ по сравнению с другими видами приводов: использование электрической энергии, распределение и преобразование которой в другие виды энергии, в том числе и в механическую, наиболее экономично; большой диапазон мощности и скорости движения; разнообразие конструктивного исполнения, что позволяет рационально соединять привод с исполнительным органом рабочей машины и использовать для работы в сложных условиях – в воде, среде агрессивных жидкостей и газов, космическом пространстве; простота автоматизации технологических процессов; высокий КПД и экологическая чистота.]

Возможности использования современных ЭП продолжают постоянно расширяться за счет достижений в смежных областях науки и техники – электромашиностроении и электроаппаратостроении, электронике и вычислительной технике, автоматике и механике.

# Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

## 1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Для выполнения своей основной функции – приведения в движение исполнительных органов рабочих машин и механизмов и управления этим движением – ЭП включает в себя совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом электротехнических, электромеханических и механических элементов и устройств. Такая электромеханическая система и получила название электрического привода. Общая структурная схема ЭП приведена на рис. 1.1, где утолщенными линиями показаны силовые каналы энергии, а тонкими линиями – маломощные (информационные) цепи.

Основным элементом любого электропривода *б* служит электрический двигатель *1*, который вырабатывает механическую энергию (МЭ) за счет потребляемой электрической энергии, т. е. является электромеханическим преобразователем энергии. В некоторых режимах работы ЭП электродвигатель осуществляет и обратное преобразование энергии, получая механическую энергию от исполнительного органа рабочей машины.

От электродвигателя механическая энергия через передаточное устройство *9* (механическое, гидравлическое, электромагнитное) подается на исполнительный орган *7* рабочей машины *8*, за счет чего тот совершает требуемое механическое движение. Функция передаточного устройства заключается в согласовании параметров движения электродвигателя и исполнительного органа. Прогрессивным направлением развития ЭП является использование непосредственного соединения электродвигателя с исполнительным органом, что позволяет повысить технико-экономические показатели работы комплекса «электропривод – рабочая машина».

Электрическая энергия поступает в ЭП от источника электроэнергии *3*.

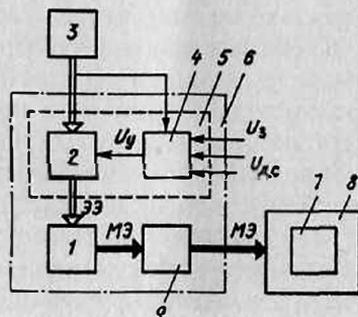


Рис. 1.1

Для получения электроэнергии с требуемыми для электродвигателя параметрами и управления потоком этой энергии между двигателем и источником электроэнергии включается силовой преобразователь 2.

Функции управления и автоматизации в ЭП осуществляются маломощным блоком управления 4. Этот блок вырабатывает сигнал управления  $U_y$  с помощью входного сигнала  $U_z$ , задающего характер движения исполнительного органа, и ряда дополнительных сигналов  $U_{дс}$ , дающих информацию о реализации технологического процесса рабочей машины, характере движения исполнительного органа, работе отдельных узлов ЭП, возникновении аварийных ситуаций и др. Преобразователь 2 вместе с блоком управления 4 образуют систему управления электроприводом 5.

Итак, электрическим приводом называется электромеханическая система, состоящая из взаимодействующих электрических, электромеханических и механических преобразователей, а также управляющих, информационных устройств и устройств сопряжения, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочих машин и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса.

В ЭП используются электродвигатели вращательного и поступательного движения постоянного и переменного тока непрерывного и дискретного перемещений; механические преобразователи в виде цилиндрических, червячных и планетарных редукторов, передач винт – гайка, цепных и ременных передач, гидравлических и электромагнитных муфт; электрические силовые преобразователи, включающие в себя управляемые выпрямители, инверторы тока и напряжения, регуляторы частоты и напряжения, импульсные регуляторы напряжения; устройства управления, в состав которых входят командоаппараты, блоки логических элементов, регуляторы, усилители, микропроцессоры и управляющие электронные машины. Как видно, реализация ЭП может быть весьма разнообразной, что находит свое отражение в их классификации.

ЭП классифицируются по характеру движения, виду и способам реализации силового преобразователя, числу используемых электродвигателей, виду источников электроэнергии, способу управления, наличию или отсутствию механической передачи и т. д. Подробно классификация ЭП рассмотрена в [3], здесь же выделим только наиболее важные ее составляющие.

По характеру движения различают ЭП вращательного и поступательного движения, при этом их скорость может быть регулируемой или нерегулируемой, а само движение – непрерывным или дискретным, однонаправленным, двунаправленным (реверсивным) или вибрационным (возвратно-поступательным).

*По числу используемых двигателей* различают групповые, индивидуальные и взаимосвязанные ЭП. Групповой ЭП характеризуется тем, что один его двигатель приводит в движение несколько исполнительных органов одной машины или один исполнительный орган нескольких рабочих машин. Индивидуальный ЭП обеспечивает движение одного исполнительного органа рабочей машины. Взаимосвязанный ЭП представляет собой два или несколько электрически или механически связанных между собой индивидуальных ЭП, работающих совместно на один или несколько исполнительных органов. При этом если двигатели связаны между собой механически и работают на общий вал, ЭП называется многодвигательным, а если двигатели связаны электрическими цепями, ЭП называется электрическим валом.

*По виду электрического силового преобразователя* различают многообразные ЭП. Если в качестве характерного признака взять способ преобразования напряжения источника электроэнергии, можно выделить четыре вида силовых преобразователей: управляемые и неуправляемые выпрямители, которые преобразуют напряжение переменного тока в напряжение постоянного (выпрямленного) тока; инверторы, выполняющие обратное преобразование; преобразователи частоты и напряжения переменного тока, изменяющие параметры напряжения переменного тока; импульсные преобразователи напряжения постоянного тока с различным видом модуляции выходного напряжения постоянного тока.

Все эти силовые преобразователи могут быть выполнены на различной элементной базе, а именно с использованием электрических машин, магнитных усилителей, ионных и полупроводниковых элементов. Современные силовые преобразователи являются, как правило, полупроводниковыми, и в них используются главным образом силовые транзисторы, диоды, тиристоры и их разновидности.

Как видно из рассмотренной далеко не полной классификации, конкретная реализация ЭП может быть самой разнообразной. Тем не менее работа любого электропривода подчиняется некоторым общим закономерностям, что и является предметом теории ЭП, основы которой рассматриваются в этой книге.

## **1.2. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЕГО РОЛЬ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

Историю ЭП обычно начинают отсчитывать с разработки русским академиком Б. С. Якоби первого двигателя постоянного тока вращательного движения. Установка этого двигателя на небольшой катер, который в 1838 г. совершил испытательные рейсы по Неве,

является первым примером реализации ЭП. В дальнейшем ЭП стали применяться, например, для наведения артиллерийской установки, перемещения электродов дуговой лампы, привода швейной машинки. Однако из-за отсутствия экономичных источников электроэнергии постоянного тока ЭП долгое время не находил широкого применения и основным оставался тепловой привод.

Не изменило кардинально этого положения и создание в 1870 г. промышленного электрического генератора постоянного тока, а также появление однофазной системы переменного тока.

Толчком к развитию ЭП явилась разработка в 1889 г. М. О. Дольво-Добровольским системы трехфазного тока и появление трехфазного асинхронного электродвигателя, что создало реальные технические и экономические предпосылки для широкого использования электрической энергии, а значит, и ЭП.

Первой научной работой по теории электропривода явилась опубликованная в 1880 г. в журнале «Электричество» статья русского инженера Д. А. Лачинова «Электромеханическая работа», в которой на научной основе были показаны преимущества электрического распределения механической энергии.

Электрификация нашей страны и широкое применение в народном хозяйстве электроприводов начались после принятия и реализации государственного плана электрификации России – плана ГОЭЛРО, который предусматривал широкое строительство новых и реконструкцию старых электростанций, строительство новых линий электропередач, развитие электротехнической промышленности. В соответствии с этим планом вводились в действие тепловые и гидравлические электростанции, тысячи километров воздушных и кабельных линий, десятки заводов по производству электрических машин, аппаратов и кабельной продукции, создавались научно-исследовательские и проектно-конструкторские институты и организации, решавшие крупные научно-технические проблемы по созданию и внедрению в народное хозяйство электроприводов различного типа.

Одновременно происходило дальнейшее развитие и теории электропривода. Впервые как самостоятельная дисциплина теория электропривода представлена в книге С. А. Ринкевича «Электрическое распределение механической энергии», вышедшей в 1925 г. Далее теория электропривода развивалась в трудах советских ученых В. П. Попова, А. Т. Голована, Д. П. Морозова, М. Г. Чиликина и многих других. Большое внимание уделялось при этом и подготовке инженерно-технических и научных кадров, призванных создавать и эксплуатировать электрические приводы.

Огромный труд рабочих, техников, инженеров и ученых нашей страны не мог не дать результатов. Так, если в 1890 г. доля мощности электродвигателей в промышленном производстве составляла

только 5% от мощности всех двигателей, то к 1927 г. эта цифра возросла до 75%, а в настоящее время она близка к 100%.

Еще больше возрастает роль уровня электровооруженности технологических процессов, а значит, электропривода в наше время, когда важнейшим направлением научно-технического прогресса стала автоматизация технологических процессов, которая позволяет повысить производительность общественного труда в народном хозяйстве, сделать его более творческим и привлекательным, что уже само по себе является решением важной социальной задачи. Характерной чертой автоматизации является быстрое развитие робототехники, внедрение гибких автоматизированных производств, автоматических линий, машин и оборудования со встроенными средствами микропроцессорной техники, многооперационных станков с числовым программным управлением, роторных конвейерных комплексов.

Дальнейшее развитие электрификации и автоматизации технологических процессов, создание высокопроизводительных машин, механизмов и технологических комплексов во многом определяется развитием электрического привода.

К основным направлениям развития современного ЭП относятся: разработка и выпуск комплектных регулируемых ЭП с использованием современных преобразователей и микропроцессорного управления;

повышение эксплуатационной надежности, унификации и улучшение энергетических показателей ЭП;

расширение области применения регулируемого асинхронного ЭП и использование ЭП с новыми типами двигателей, а именно линейными, шаговыми, вентильными, вибрационными, повышенного быстродействия, магнитогидродинамическими и др.;

развитие научно-исследовательских работ по созданию математические модели и алгоритмов технологических процессов, а также машинных средств проектирования ЭП;

подготовка инженерно-технических и научных кадров, способных проектировать, создавать и эксплуатировать современный автоматизированный электропривод.

Решение этих и ряда других проблем позволит существенно улучшить технико-экономические характеристики ЭП и создать тем самым базу для дальнейшего технического прогресса во всех отраслях промышленного производства, транспорта, сельского хозяйства и в быту.

### Контрольные вопросы

1. Назовите характерные технологические процессы в промышленном производстве.
2. Приведите свои примеры рабочих машин и их исполнительных органов, реализующих технологические процессы и операции.

3. Каковы особенности функционирования исполнительных органов рабочих машин ?
4. Охарактеризуйте механическое движение исполнительного органа рабочей машины.
5. Что такое момент или сила сопротивления ?
6. Каковы преимущества электрического привода ?
7. Дайте определение электрического привода и приведите примеры реализации его элементов.
8. Как классифицируются электрические приводы ?
9. Назовите основные этапы развития электрического привода.
10. Чем характеризуется развитие современного электрического привода ?

## Глава 2. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В этой главе анализируется механическое движение исполнительных органов рабочих машин и элементов ЭП в установившемся и неустановившемся (переходном) режимах.

### 2.1. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В механическом движении участвуют подвижная часть электродвигателя (ротор или якорь), элементы механического передаточного устройства и исполнительный орган. Совокупность этих элементов называют механической частью ЭП.

Движение любого элемента механической части ЭП (или исполнительного органа рабочей машины) подчиняется известным из курса физики законам механики. Поступательное и вращательное движения описываются соответственно следующими уравнениями:

$$\sum F = m dv/dt + v dm/dt; \quad (2.1)$$

$$\sum M = J d\omega/dt + \omega dJ/dt, \quad (2.2)$$

где  $\sum F$  и  $\sum M$  – соответственно совокупность сил и моментов, действующих на элемент;  $m$  и  $J$  – соответственно масса и момент инерции элемента;  $t$  – время,  $\omega$  и  $v$  – соответственно угловая и линейная скорости движения элемента.

Уравнения движения по своему характеру являются дифференциальными, поскольку содержат производные скорости, массы и момента инерции. В большинстве случаев масса и момент инерции элементов при движении не изменяются, их производные оказываются равными нулю и уравнения (2.1) и (2.2) упрощаются:

$$\sum F = m dv/dt = ma; \quad (2.3)$$

$$\sum M = J d\omega/dt = J\varepsilon, \quad (2.4)$$

где  $a = dv/dt$  и  $\varepsilon = d\omega/dt$  — соответственно ускорения при поступательном и вращательном движениях.

Уравнения (2.3) и (2.4) отражают известный закон механики: ускорение движения механического элемента (тела) пропорционально алгебраической сумме действующих на него сил (моментов) и обратно пропорционально его массе (моменту инерции). Если

$$\sum F = 0; \quad \sum M = 0, \quad (2.5)$$

то  $dv/dt = d\omega/dt = 0$  и элемент движется с постоянной скоростью или находится в состоянии покоя.

Другими словами, элемент будет двигаться с неизменной скоростью (или будет неподвижным), если сумма сил или моментов, к нему приложенных, будет равна нулю. Такое движение называют установившимся.

При  $\sum F > 0$  или  $\sum M > 0$  элемент будет двигаться с ускорением, а при  $\sum F < 0$  или  $\sum M < 0$  — с замедлением. Условия (2.5) используются для определения параметров установившегося механического движения.

## 2.2. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ОДНОМАССОВАЯ СХЕМА

Элементы, образующие механическую часть ЭП, связаны между собой и оказывают тем самым друг на друга соответствующее воздействие. Поэтому, анализируя механическое движение того или иного элемента, необходимо учитывать влияние на него других элементов кинематической схемы ЭП. Это достигается соответствующим пересчетом входящих в уравнения (2.1)...(2.4) сил, моментов, масс и моментов инерции к элементу, движение которого рассматривается. Такой расчет в теории ЭП получил название операции приведения, а сами пересчитанные переменные и параметры называют приведенными.

Рассмотрим подробнее операцию приведения и получим соответствующие математические формулы на примере механической части ЭП подъемной лебедки, кинематическая схема которой приведена на рис. 2.1, а. Электродвигатель 1 вращательного движения с моментом инерции  $J_d$  через одноступенчатый редуктор 4 с парой шестерен 5 и 6 приводит во вращение с угловой скоростью  $\omega_6$  барабан 8 подъемной лебедки, который с помощью троса 9 и крюка 10 поднимает (или опускает) с линейной скоростью  $V_{\text{ию}}$  груз 11 мас-

сой  $m$ . На схеме показаны также соединительные механические муфты 3 и 7, первая из которых служит шкивом для механического тормоза 2. Примем допущения, что все элементы приведенной кинематической схемы являются абсолютно жесткими и между ними отсутствуют зазоры.

Операцию приведения можно выполнять относительно любого элемента, движение которого подлежит рассмотрению. Обычно в качестве такого элемента выбирают двигатель 1, являющийся источником механического движения. В этом случае сущность операции приведения состоит в том, что реальная схема механической части ЭП (см. рис. 2.1, а) заменяется некоторой расчетной (эквивалентной) схемой, основой которой является двигатель 1 (см. рис. 2.1, б), а остальные элементы этой схемы представляются некоторыми пока неизвестными приведенными моментом нагрузки (сопротивления)  $M_c$  и моментом инерции  $J$ . Такая расчетная схема получила название одномассовой схемы или жесткого приведенного механического звена.

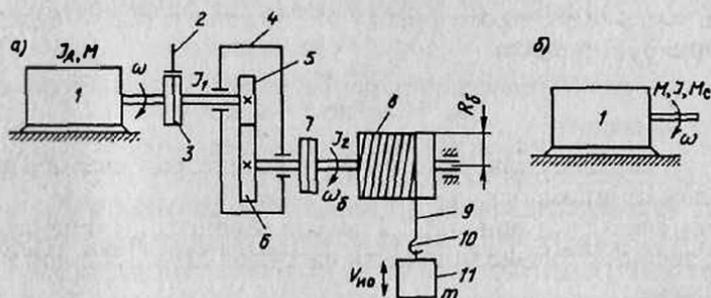


Рис. 2.1

Математические соотношения, позволяющие определить  $M_c$  и  $J$  и тем самым перейти к расчетной схеме, определяются исходя из закона сохранения энергии.

**Определение приведенного момента инерции  $J$ .** Запишем выражения для определения кинетической энергии элементов в реальной (см. рис. 2.1, а) и расчетной (см. рис. 2.1, б) схемах и приравняем их друг к другу

$$J\omega^2/2 = J_d\omega^2/2 + J_1\omega^2/2 + J_2\omega_6^2/2 + mv_{HO}^2/2, \quad (2.6)$$

где  $J_1$  – суммарный момент инерции элементов, вращающихся со скоростью  $\omega$  (кроме двигателя),  $J_2$  – момент инерции элементов, вращающихся со скоростью барабана  $\omega_6$ .

Умножая обе части выражения (2.6) на  $2/\omega^2$ , получим

$$J = J_d + J_1 + J_2(\omega_6/\omega)^2 + m(v_{HO}/\omega)^2. \quad (2.7)$$

Отметим, что в (2.7) отношение  $\omega/\omega_6 = z_2/z_1 = i$  ( $z_2$  и  $z_1$  – соответственно число зубцов шестерен 6 и 5) является передаточным отношением редуктора, а отношение  $v_{\text{ио}}/\omega = \rho = \omega_6 R_6/\omega = R_6/i$  представляет собой так называемый радиус приведения кинематической схемы между исполнительным органом (крюком 10) и валом двигателя. С учетом этого окончательно получим

$$J = J_{\text{д}} + J_1 + J_2/i^2 + m\rho^2. \quad (2.8)$$

Из (2.8) вытекает общее правило: для расчета  $J$  следует моменты инерции вращающихся элементов разделить на квадрат передаточного числа кинематической схемы между этими элементами и валом двигателя, а массы поступательно движущихся элементов умножить на квадрат радиуса приведения и полученные результаты расчета сложить с моментами инерции двигателя и элементов, вращающихся с его скоростью.

**Определение приведенного момента нагрузки  $M_c$ .** При подъеме груза к исполнительному органу от ЭП должна быть подведена механическая мощность

$$P_{\text{ио}} = F_{\text{ио}}v_{\text{ио}} = mgv_{\text{ио}},$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;  $F_{\text{ио}}$  – усилие, развиваемое исполнительным органом.

Учитывая с помощью КПД потери мощности в кинематической цепи, запишем баланс мощности нагрузки ЭП в реальной и расчетной схемах:

$$M_c\omega = mgv_{\text{ио}}/\eta, \quad (2.9)$$

где  $\eta = \eta_p\eta_6$  – результирующий КПД кинематической схемы ЭП;  $\eta_p$  и  $\eta_6$  – соответственно КПД редуктора 4 и барабана 8.

Разделив обе части (2.9) на  $\omega$ , находим

$$M_c = mgv_{\text{ио}}/(\eta\omega) = F_{\text{ио}}\rho/\eta. \quad (2.10)$$

Если исполнительный орган совершает не поступательное, а вращательное движение, то

$$M_c\omega = M_{\text{ио}}\omega_{\text{ио}}/\eta, \quad (2.11)$$

где  $M_{\text{ио}}$ ,  $\omega_{\text{ио}}$  – соответственно момент нагрузки и скорость исполнительного органа, а приведенный момент нагрузки

$$M_c = M_{\text{ио}}/(\eta i). \quad (2.12)$$

При спуске груза запасенная в нем потенциальная энергия передается к двигателю, частично расходуясь на преодоление потерь в кинематической схеме. В силу этого к двигателю поступает меньшая энергия и тогда при поступательном движении

$$M_c = F_{\text{ио}} \eta_p, \quad (2.13)$$

а при вращательном

$$M_c = M_{\text{ио}} \eta / i. \quad (2.14)$$

Отметим, что приведенный момент нагрузки  $M_c$  также называют статическим моментом или моментом сопротивления.

При использовании в ЭП двигателя поступательного движения, пока еще редко применяемого, приведение осуществляется по тем же принципам.

Выполнение операции приведения и переход тем самым к расчетной схеме рис. 2.1, б позволяет раскрыть левую часть уравнения (2.4). В общем случае входящие в него моменты двигателя  $M$  и сопротивления  $M_c$  могут иметь как положительные, так и отрицательные знаки:

$$\pm M \pm M_c = J d\omega/dt. \quad (2.15)$$

Правило, по которому определяются эти знаки, следующее: если направление действия момента совпадает с направлением скорости, то такой момент считается положительным, и наоборот.

В наиболее типичном для ЭП случае двигатель создает движущий момент, а исполнительный орган – момент сопротивления движению. Тогда (2.15) принимает следующий вид:

$$M - M_c = J d\omega/dt. \quad (2.16)$$

Левая часть уравнения (2.16), представляющая собой разность моментов двигателя и нагрузки и определяющая условия ускорения или замедления движения, в теории электропривода получила название динамического момента,  $M_{\text{дин}} = M - M_c$ .

**Задача 2.1\***. Выполнить операцию приведения в случае подъема груза при следующих параметрах кинематической схемы (см. рис. 2.1, а):  $J_a = 0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $J_1 = 0,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $J_2 = 2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $m = 1000 \text{ кг}$ ;  $R_6 = 1,15 \text{ м}$ ;  $v_{\text{ио}} = 0,9 \text{ м/с}$ ;  $z_1 = 14$ ;  $z_2 = 86$ ;  $\eta_p = 0,97$ ;  $\eta_6 = 0,96$ .

Передаточное число редуктора

$$i = z_2/z_1 = 86/14 = 6,14;$$

радиус приведения кинематической схемы

$$\rho = R_6 / i = 0,15 / 6,14 = 0,024 \text{ м;}$$

момент инерции

$$J = J_D + J_1 + J_2 / i^2 + m\rho^2 = 0,1 + 0,02 + 2 / 6,14^2 + 1000 \cdot 0,024^2 = 0,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

приведенный момент нагрузки

$$M_c = mg\rho / (\eta_p \eta_6) = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,024 / (0,97 \cdot 0,96) = 253 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

**Задача 2.2.** Для рассмотренного выше примера определить  $J$  и  $M_c$  в случае спуска груза, приняв те же значения параметров и КПД кинематической схемы.

**Задача 2.3.** Записать в общем виде формулы для определения  $J$  и  $M_c$ , если заданы следующие параметры кинематической схемы лифта, приведенной на рис. 2.2: грузоподъемность лифта  $m$ , кг; скорость движения кабины  $b - v_{\text{ко}}$ , м/с; масса кабины  $m_k$ , кг; масса противовеса  $8 - m_{\text{пв}}$ , кг; диаметр канатопроводящего шкива  $5 - d_{\text{кш}}$ , м; передаточное число редуктора  $4 - i_p$ ; КПД механической части  $\eta_{\text{м.ч}}$ ; длина троса  $7 - L$ , м; масса погонного метра троса  $m_t$ , кг/м; моменты инерции элементов, вращающихся со скоростями  $\omega$  и  $\omega_{\text{кш}}$ , соответственно  $J_1$  и  $J_2$ , а также момент инерции двигателя  $2 - J_D$ . Двигатель  $2$  связан с тормозом  $1$  и через муфту  $3$  с редуктором  $4$ .

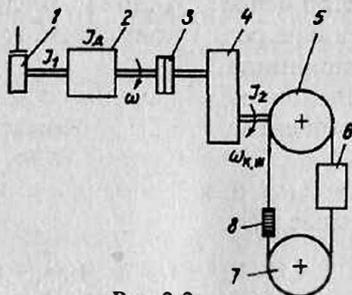


Рис. 2.2

**Задача 2.4.** Для кинематической схемы механической части ЭП тележки мостового крана, приведенной на рис. 2.3, определить  $J$  и  $M_c$  при следующих исходных данных: скорость перемещения тележки  $v_{\text{ко}} = 0,8$  м/с; диаметр ходовых колес  $d_{\text{хк}} = 0,6$  м; общая масса тележки с грузом  $m_t = 8500$  кг, сила сопротивления движению тележки  $F_{\text{НО}} = 120000$  Н;  $J_2 = 0,1$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_1 = 0,15$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_3 = 0,05$  кг·м<sup>2</sup>;  $z_1 = 20$ ;  $z_2 = 79$ ;  $z_3 = 16$ ;  $z_4 = 83$ ; КПД одной шестеренчатой пары  $\eta_n = 0,97$ .

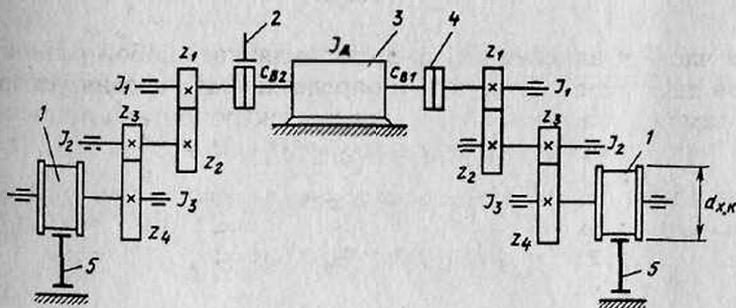


Рис. 2.3

На схеме: 1 - ходовые колеса, 2 - тормоз, 3 - двигатель, 4 - муфта, 5 - рельсы

### 2.3. МНОГОМАССОВЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ

Реальные кинематические схемы ЭП содержат упругие элементы (элементы конечной жесткости), между которыми могут существовать зазоры. Так, например, в схеме рис. 2.1, а таким упругим элементом является трос 9, на котором подвешивается груз. При значительной протяженности к упругим элементам относят и соединительные валы. Зазоры в этой схеме могут существовать в соединительных муфтах 3 и 7, а также в шестеренчатом зацеплении и подшипниках.

Наличие упругих элементов и зазоров усложняет расчетную схему механической части ЭП, превращая ее в многомассовую. Так, если в расчет принимать упругость одного элемента и зазоры при этом не учитывать, то выполнение операции приведения позволит представить механическую часть ЭП в виде так называемой двухмассовой расчетной схемы, изображенной на рис. 2.4.

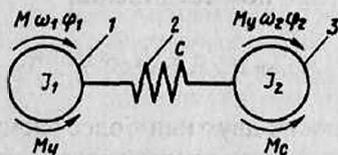


Рис. 2.4

В этой схеме упругий элемент 2 с коэффициентом жесткости  $c$  соединяет две массы 1 и 3 с моментами инерции соответственно  $J_1$  и  $J_2$ . Первая из масс, которая включает в себя массу движущейся части двигателя и жестко связанных с ним элементов кинематической схемы, вращается со скоростью  $\omega_1$ , а другая масса, включающая в себя массу исполнительного органа и жестко связанных с ним элементов, — со скоростью  $\omega_2$ . К первой массе приложен при этом момент двигателя  $M$  и упругий момент  $M_y$ , а ко второй — упругий момент и момент нагрузки  $M_c$ . Движение двухмассовой системы описывается в этом случае совокупностью следующих уравнений:

$$\begin{aligned} M - M_y &= J_1 d\omega_1/dt; \\ M_y - M_c &= J_2 d\omega_2/dt; \\ M_y &= c(\varphi_1 - \varphi_2), \end{aligned} \quad (2.17)$$

где  $\varphi_1, \varphi_2$  — углы поворота соответственно первой и второй масс;  $c$  — коэффициент жесткости, определяемый материалом и геометрическими размерами упругого элемента 2.

Приведение коэффициента жесткости к валу двигателя упругого стержня осуществляется по формуле

$$c = c_{y.c} \rho^2, \quad (2.18)$$

а к валу двигателя упругого вала (оси) вращения – по формуле

$$c = c_B / i^2, \quad (2.19)$$

где  $c_{y.c}$  и  $c_B$  – соответственно коэффициенты жесткости упругого стержня, Н/м, и упругого вала, Н·м.

При параллельном соединении нескольких упругих элементов с коэффициентами жесткости  $c_1, c_2, c_3, \dots$  эквивалентная жесткость

$$c_{\text{экр}} = c_1 + c_2 + c_3 + \dots,$$

а при их последовательном соединении

$$1/c_{\text{экр}} = 1/c_1 + 1/c_2 + 1/c_3 + \dots$$

При учете упругости двух или более элементов расчетная схема получается соответственно трехмассовой, четырехмассовой и т.д. Многомассовые расчетные схемы получаются и в том случае, когда необходимо принять во внимание зазоры в кинематической схеме ЭП. Движение элементов в многомассовых схемах более сложное и многообразное [2], и для его анализа требуется применение вычислительной техники.

**Задача 2.5\***. Для механической части ЭП из задачи 2.1 (см. рис. 2.1, а) получить расчетную схему с учетом упругости троса, коэффициент жесткости которого  $c = 1 \cdot 10^5$  Н/м. Массу троса не учитывать.

Упругий элемент (трос) разделяет поднимаемый груз и остальную механическую часть ЭП. Так как условием задачи предусматривается учет только одной упругости, то расчетная схема будет двухмассовой (см. рис. 2.4).

Тогда момент инерции первой массы

$$J_I = J_d + J_1 + J_2 / i^2 = 0,1 + 0,02 + 2/6,14^2 = 0,175 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

а момент инерции второй массы

$$J_{II} = m \rho^2 = 1000 \cdot 0,025^2 = 0,625 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

**Задача 2.6.** Для кинематической схемы тележки крана, приведенной на рис. 2.3, получить в общем виде расчетную схему при учете упругости валов, имеющих коэффициенты жесткости  $c_{a1}$  и  $c_{a2}$ .

## 2.4. УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ

Для расчетной одномассовой схемы, приведенной на рис. 2.1, б, установившееся механическое движение ЭП будет определяться равенством моментов двигателя и нагрузки, т.е. условием  $M = M_c$ . Проверка выполнения этого условия может производиться аналитически или с помощью так называемых механических характеристик двигателя и исполнительного органа.

*Механической характеристикой двигателя* называется зависимость его скорости от развиваемого момента  $\omega(M)$  (для вращательного движения) или усилия  $\nu(F)$  (для поступательного движения). Различают естественную и искусственную характеристики двигателей.

Естественная характеристика двигателя (она у него единственная) соответствует основной (паспортной) схеме его включения и номинальным параметрам питающего напряжения. Естественные механические характеристики двигателей вращательного движения приведены на рис. 2.5, а (1...4 – соответственно синхронного, постоянного тока с независимым возбуждением, асинхронного и постоянного тока с последовательным возбуждением). На естественной характеристике располагается точка номинального (паспортного) режима работы двигателя с координатами  $\omega_{ном}$ ,  $M_{ном}$ .

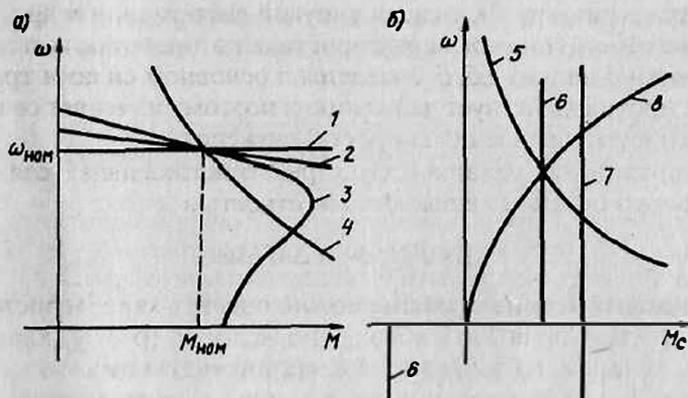


Рис. 2.5

Если включение двигателя происходит не по основной схеме, или в его электрические цепи включены какие-либо дополнительные электротехнические элементы (резисторы, реакторы, конденсаторы), или двигатель питается напряжением с ненормальными параметрами, то его характеристики будут называться искусствен-

ными. Таких характеристик у двигателя может быть сколь угодно много. Поскольку эти характеристики получают с целью регулирования переменных (координат) двигателя – тока, момента, скорости, положения, то они иногда называются регулировочными. Искусственные характеристики двигателя и способы их получения подробно рассматриваются далее.

*Механической характеристикой исполнительного органа* называется зависимость скорости его движения от усилия или момента на нем, т.е.  $\omega_{ио}(M_{ио})$  при вращательном движении и  $v_{ио}(F_{ио})$  при поступательном движении. В результате операции приведения эти характеристики преобразуются в зависимость вида  $\omega(M_c)$ , где  $\omega$  – скорость двигателя, а  $M_c$  – приведенный к его валу момент нагрузки (сопротивления). Механические характеристики некоторых исполнительных органов приведены на рис. 2.5, б (5 – механизма главного движения металлообрабатывающего станка; 6 – транспортера, механизма подачи станка; 7 – подъемного механизма; 8 – вентилятора, дымососа, компрессора и центробежного насоса). Отметим, что реальные механические характеристики исполнительных органов более сложны по своему виду и обычно представляют собой сочетание показанных на рис. 2.5, б зависимостей.

По характеру действия моменты нагрузки  $M_c$  делятся на активные и реактивные. *Активные моменты* имеют постоянное, не зависящее от скорости направление своего действия и создаются так называемыми потенциальными силами – силами притяжения Земли (характеристика 7), силами упругой деформации и др.

*Реактивный момент*, характеристика которого соответствует зависимости 6 на рис. 2.5, б, создается в основном силами трения, он всегда противодействует движению и поэтому изменяет свой знак с изменением направления скорости движения.

Количественно механические характеристики двигателя и исполнительного органа оцениваются жесткостью

$$\beta = dM/d\omega \approx \Delta M/\Delta\omega. \quad (2.20)$$

Используя этот показатель, можно оценить характеристику синхронного двигателя 1 как абсолютно жесткую ( $\beta = \infty$ ), характеристику асинхронного двигателя 3 – как имеющую переменную положительную и отрицательную жесткости, а характеристику подъемного механизма 7 – как имеющую нулевую жесткость ( $\beta = 0$ ) и т.д.

Введенное понятие механических характеристик позволяет графически выполнить проверку условия установившегося движения и найти его параметры. Для этого в одном и том же квадранте совмещаются характеристики двигателя 1 и исполнительного органа 2, как это показано на рис. 2.6. Точка А пересечения этих характеристик, в которой моменты двигателя и исполнительного органа

равны, и будет соответствовать установившемуся движению со скоростью  $\omega_{уст}$  и моментом  $M_{уст}$ .

Аналитический способ для такой проверки применяется в тех случаях, когда механические характеристики двигателя и нагрузки заданы в виде двух уравнений, совместное решение которых при условии  $M = M_c$  дает искомое значение  $\omega_{уст}$ . Подстановка этого значения скорости в любое из двух уравнений механических характеристик позволяет получить значение установившегося момента.

Видом механических характеристик двигателя и исполнительного органа определяется устойчивость установившегося движения. Под устойчивостью понимается свойство системы «двигатель – исполнительный орган» поддерживать движение со скоростью  $\omega_{уст}$  или с минимально возможными отклонениями от нее. Рассмотрим способ определения устойчивости движения с помощью механических характеристик (см. рис. 2.6).

Предположим, что по какой-то причине скорость ЭП повысилась до уровня  $\omega_1$ . Выясним, что будет происходить со скоростью, если вызвавшая ее изменение причина исчезнет. Из характеристик двигателя и исполнительного органа видно, что при скорости  $\omega_1$  момент нагрузки  $M_{c1}$  больше момента двигателя  $M_1$ , т.е.  $M_1 < M_{c1}$ . Тогда в соответствии с (2.16) в системе «двигатель – исполнительный орган» будет действовать отрицательный динамический момент. Начнется процесс торможения ( $d\omega/dt < 0$ ), который закончится при скорости  $\omega_{уст}$ .

Рассмотрим теперь положение, при котором кратковременное возмущение вызвало снижение скорости до уровня  $\omega_2 < \omega_{уст}$ . В этом случае  $M_2 > M_{c2}$  и под действием уже положительного динамического момента скорость начнет возрастать, пока не достигнет уровня  $\omega_{уст}$ . Таким образом, система «двигатель – исполнительный орган» с приведенными на рис. 2.6 механическими характеристиками обладает свойством возвращаться к скорости установившегося движения при возможных отклонениях от нее, т.е. движение в такой системе является устойчивым.

Проверка на устойчивость движения может быть выполнена также аналитически с использованием понятия жесткости характеристик. Движение будет устойчиво при выполнении условия

$$\beta - \beta_c < 0 \quad \text{или} \quad \beta < \beta_c, \quad (2.21)$$

где  $\beta$  и  $\beta_c$  – соответственно жесткости механических характеристик двигателя и исполнительного органа.

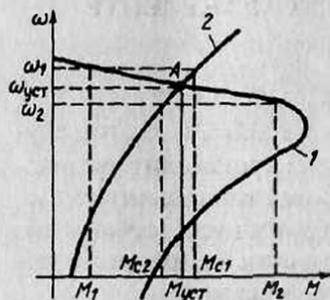


Рис. 2.6

**Задача 2.7\*.** Уравнения двигателя и исполнительного органа рабочей машины имеют соответственно вид  $\omega = 300 - 3M$  и  $M = 30 + 2\omega$ . Определить аналитически установившиеся скорость  $\omega_{уст}$  и момент  $M_{уст}$ .

Используя условие установившегося движения  $M = M_c$ , запишем

$$30 + 2 \omega_{уст} = (300 - 3\omega_{уст})/3, \text{ откуда } \omega_{уст} = 30 \text{ рад/с.}$$

Подставляя полученное значение скорости в любое из двух уравнений, получим значение установившегося момента  $M_{уст} = 90 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

**Задача 2.8.** На рис. 2.7 изображены различные механические характеристики двигателя 1 и исполнительного органа 2. Определить графически во всех

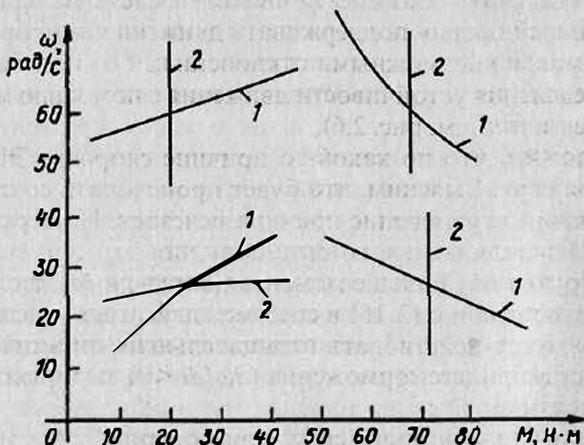


Рис. 2.7

случаях скорость установившегося движения, жесткость характеристик в области точки их пересечения и устойчивость установившегося движения ЭП.

## 2.5. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ МОМЕНТЕ

Неустановившееся движение ЭП имеет место, когда моменты двигателя и нагрузки отличаются друг от друга, т. е.  $M \neq M_c$ . В этом случае динамический момент  $M_{дин}$  не равен нулю и происходит увеличение или снижение скорости движения. Наиболее типичными примерами неустановившегося движения в ЭП являются пуск, торможение и реверс двигателя, его переходы с одной скорости на другую в процессе ее регулирования или изменения нагрузки на валу.

Неустановившееся движение возникает при переходе ЭП из установившегося движения с одними параметрами к установившему-

ся движению с другими параметрами (если, конечно, движение устойчивое). По этой причине неустановившееся движение называют также переходным процессом или переходным режимом ЭП.

Целью рассмотрения неустановившегося движения является получение зависимостей механических переменных (координат) ЭП – моментов, скорости и угла поворота вала двигателя от времени. Рассмотрим переходные процессы в механической части ЭП, обусловленные инерционностью движущихся элементов. Иногда такие процессы называют механическими.

Искомые зависимости получим решением (интегрированием) дифференциального уравнения механического движения (2.15), а также дифференциального уравнения  $\omega = d\varphi/dt$ , связывающего угол поворота  $\varphi$  вала двигателя и его скорость  $\omega$ .

Для решения этих уравнений необходимо знать законы изменения моментов двигателя и нагрузки, а также массы и моменты инерции движущихся элементов и начальные (нулевые) значения переменных.

В общем случае моменты двигателя и нагрузки, а иногда и момент инерции могут являться функциями времени, скорости и положения ИО (угла поворота вала двигателя).

Из всего многообразия возможных переходных процессов рассмотрим наиболее часто имеющие место случаи, когда моменты двигателя и нагрузки ЭП являются постоянными величинами, не зависящими от скорости или времени, а моменты инерции и массы движущихся элементов не изменяются в переходных процессах. Другие возможные переходные процессы см. в [4].

На рис. 2.8, а приведены механические характеристики двигателя 2 и нагрузки (исполнительного органа) 1, при которых их моменты неизменны, т. е. динамический момент постоянен и положителен. Уравнение движения (2.16) в этом случае решается методом разделения переменных, т. е.

$$\omega = (M - M_c)t/J + C. \quad (2.22)$$

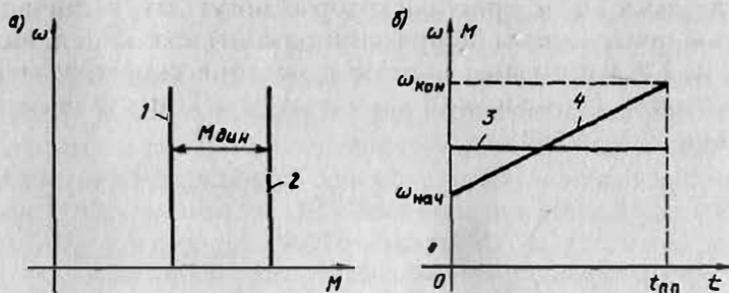


Рис. 2.8

Постоянная интегрирования  $C$  находится из начального условия переходного процесса: при  $t = 0$   $\omega = \omega_{\text{нач}}$ . Подставляя это условие в (2.22), получим  $C = \omega_{\text{нач}}$ . Тогда окончательно (2.22) принимает вид

$$\omega = \left[ (M - M_c) / J \right] t + \omega_{\text{нач}}. \quad (2.23)$$

Полученная формула показывает, что при разбеге ЭП (см. рис. 2.8, б) скорость  $\omega$  линейно зависит от времени  $t$ : при  $(M - M_c) > 0$  она увеличивается (прямая 4), а при  $(M - M_c) < 0$  — снижается. Момент двигателя от времени не зависит (прямая 3).

Время переходного процесса  $t_{\text{п.п}}$ , за которое скорость изменится от некоторого начального  $\omega_{\text{нач}}$  до конечного  $\omega_{\text{кон}}$  уровня, определяется из (2.23) при подстановке в нее  $t = t_{\text{п.п}}$  и  $\omega = \omega_{\text{кон}}$ :

$$t_{\text{п.п}} = J (\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) / (M - M_c). \quad (2.24)$$

**Задача 2.9.** Рассчитать и построить зависимость  $\omega(t)$  при следующих исходных данных:  $M = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;  $M_c = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;  $J = 0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $\omega_{\text{нач}} = 100 \text{ рад/с}$ . Рассчитать время переходного процесса, за которое скорость снизится в два раза.

**Задача 2.10.** Определить динамический момент, который при  $J = 0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  обеспечит увеличение скорости на  $200 \text{ рад/с}$  за время  $t_{\text{п.п}} = 1 \text{ с}$ .

**Задача 2.11.** Получить общее выражение для определения зависимости угла поворота вала двигателя от времени  $\varphi(t)$  для случая постоянного динамического момента и оценить вид этой зависимости.

## 2.6. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ПРИ ЛИНЕЙНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ДВИГАТЕЛЯ И ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА

При линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа динамический момент ЭП также линейно зависит от скорости. Такие переходные процессы характерны для ЭП с двигателями постоянного тока независимого возбуждения, а также двигателями, характеристики которых могут быть частично или полностью представлены (аппроксимированы) прямыми линиями.

На рис. 2.9, а показаны линейные механические характеристики двигателя 1 и исполнительного органа 2, построенные по следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} M &= M_{\text{к.з}} - \beta \omega; \\ M_c &= M_{\text{с0}} + \beta_c \omega, \end{aligned} \quad (2.25)$$

где  $M_{\text{к.з}}$  и  $M_{\text{с0}}$  — моменты двигателя и исполнительного органа при нулевой скорости.

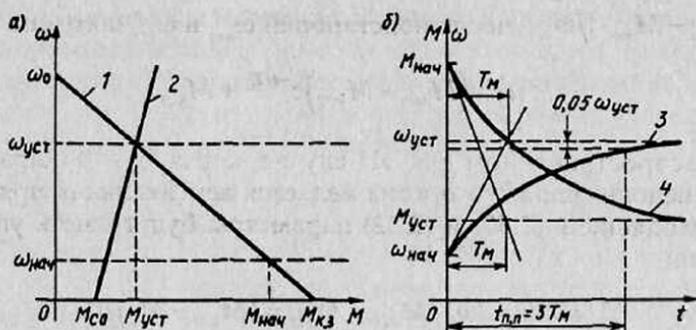


Рис. 2.9

Подставляя эти выражения в уравнение движения (2.16), получим

$$M - M_c = M_{к.з} - \beta\omega - M_{с0} - \beta_c\omega = J(d\omega/dt). \quad (2.26)$$

В обычной для дифференциальных уравнений форме (2.26) будет иметь вид

$$T_m(d\omega/dt) + \omega = \omega_{уст}, \quad (2.27)$$

где  $T_m = J/(\beta + \beta_c)$  – электромеханическая постоянная времени, с;  $\omega_{уст} = (M_{к.з} - M_{с0})/(\beta + \beta_c)$  – установившаяся скорость, соответствующая точке пересечения характеристик двигателя и исполнительного органа.

Выражение (2.27) по своей форме является линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка, решение которого имеет вид

$$\omega(t) = Ae^{-t/T_m} + \omega_{уст}, \quad (2.28)$$

где постоянный коэффициент  $A$  определяется из начальных условий переходного процесса: при  $t = 0$   $\omega = \omega_{нач}$ , т. е.

$$A = \omega_{нач} - \omega_{уст}. \quad (2.29)$$

Тогда окончательно зависимость изменения скорости от времени будет иметь вид

$$\omega(t) = (\omega_{нач} - \omega_{уст})e^{-t/T_m} + \omega_{уст}. \quad (2.30)$$

Запишем момент двигателя в функции времени, исходя из (2.25):

$$M(t) = M_{к.з} - \beta\omega(t). \quad (2.31)$$

С учетом того, что  $\beta = \Delta M/\Delta\omega = M_{к.з}/\omega_0 = (M_{к.з} - M_{уст})/\omega_{уст} =$

$= (M_{к.з} - M_{нач}) / \omega_{нач}$ , после подстановки  $\omega_{нач}$  и  $\omega_{уст}$  получим

$$M(t) = (M_{нач} - M_{уст}) e^{-t/T_m} + M_{уст}. \quad (2.32)$$

В распространенном для ЭП случае, когда  $\beta_c = 0$  (характеристикой исполнительного органа является вертикальная прямая линия), входящие в (2.30) и (2.32) параметры будут иметь упрощенный вид

$$T_m = J/\beta = J\omega_0/M_{к.з}; \quad \omega_{уст} = (M_{к.з} - M_c)/\beta.$$

Время переходного процесса  $t_{п.п.}$ , за которое скорость двигателя изменится от некоторого начального значения  $\omega_{нач}$  до конечного  $\omega_{кон}$ , определяется в этом случае логарифмированием (2.30):

$$t_{п.п.} = T_m \ln \left[ \frac{(\omega_{уст} - \omega_{нач})}{(\omega_{уст} - \omega_{кон})} \right]. \quad (2.33)$$

Анализ полученных выражений (2.30) и (2.32) показывает, что скорость и момент двигателя изменяются во времени по экспоненциальному закону с постоянной времени  $T_m$ . На рис. 2.9, б показаны графики переходного процесса разбега:  $\omega(t)$  – кривая 3 и  $M(t)$  – кривая 4 при увеличении скорости двигателя от  $\omega_{нач}$  до  $\omega_{уст}$ . Отметим, что начальные и установившиеся уровни скорости и момента определяются из рис. 2.9, а, отражая связь установившегося и переходного движений ЭП.

Как следует из (2.33), время достижения установившихся уровней скорости и момента (т.е. время переходного процесса) является бесконечно большим. Поэтому в технических расчетах используют так называемое практическое время переходного процесса, принимаемое обычно равным трем постоянным времени, т.е.  $t_{п.п.} = 3T_m$ . За этот интервал времени скорость достигает 95% своего установившегося значения.

Постоянная времени  $T_m$  имеет определенное графическое и физическое выражение. На рис. 2.9, б она равна отрезку, отсекаемому касательной, проведенной к кривой переходного процесса в точке  $t = 0$  на горизонтальной прямой, соответствующей установившемуся значению переменной (скорости или момента). Количественно  $T_m$  равна времени разгона  $t_p$  двигателя без нагрузки ( $M_c = 0$ ) из неподвижного состояния ( $\omega_{нач} = 0$ ) до скорости идеального холостого хода  $\omega_0 = \omega_{уст}$  под действием пускового момента  $M_{к.з}$ . Действительно, из формулы (2.24) для указанных условий следует, что

$$t_{п.п.} = t_p = J\omega_0/M_{к.з} = T_m.$$

**Задача 2.12.** Выполнить расчет и построение кривых переходного процесса  $\omega(t)$  и  $M(t)$  при линейной механической характеристике двигателя и следующих исходных данных:  $\omega_{\text{нач}} = 0$ ;  $\omega_{\text{уст}} = 150$  рад/с,  $M_{\text{нач}} = M_{\text{х.з}} = 150$  Н·м;  $\omega_0 = 200$  рад/с;  $M_{\text{уст}} = M_c = 40$  Н·м;  $J = 0,1$  кг·м<sup>2</sup>. Оценить практическое время переходного процесса.

**Задача 2.13.** Рассчитать и построить зависимости  $\omega(t)$  и  $M(t)$  для двигателя, механическая характеристика которого приведена на рис. 2.10, если  $M_c = 0$ ,  $\omega_{\text{нач}} = 200$  рад/с.

**Задача 2.14.** Двигатель, механическая характеристика 3 которого приведена на рис. 2.11, работая в установившемся режиме (точка А), преодолел момент сопротивления  $M_{c1} = 150$  Н·м. В момент времени  $t = 0$ , принимаемый за начало отсчета, произошло скачкообразное изменение момента нагрузки (прямые 1, 2) до уровня  $M_{c2} = 250$  Н·м (точка Б). Рассчитать и построить зависимости  $\omega(t)$  и  $M(t)$ , соответствующие этому увеличению нагрузки.

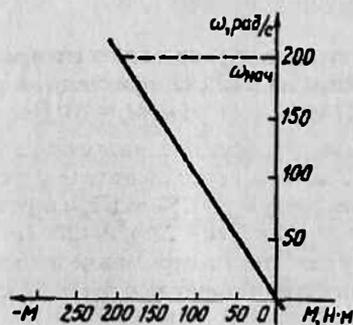


Рис. 2.10

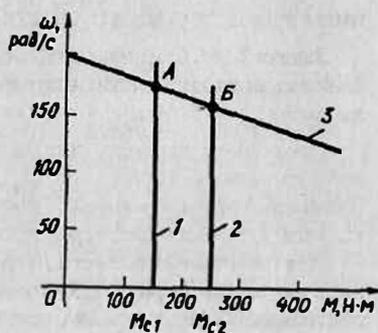


Рис. 2.11

**Задача 2.15.** Используя выражение (2.30), получить общее выражение изменения во времени угла поворота вала двигателя  $\varphi(t)$ . Рассчитать и построить эту зависимость для условий задачи 2.12.

## 2.7. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ МОМЕНТЕ

При переходных процессах этого вида моменты двигателя и исполнительного органа различны и могут быть нелинейными функциями скорости, времени или положения. Основная сложность получения искомых зависимостей  $\omega(t)$  и  $M(t)$  заключается в интегрировании уравнения движения (2.15), которое не имеет универсального способа решения. Поэтому в зависимости от исходных данных и требуемой точности расчета могут применяться различные методы получения кривых переходного процесса, которые кратко рассматриваются далее.

**Линеаризация нелинейных механических характеристик двигателя и исполнительного органа основана на представлении (аппроксимации) этих характеристик или их отдельных участков прямыми линиями. В этом случае для построения кривых переходного процесса или расчета его продолжительности используются формулы (2.24), (2.30) и (2.32). Если механические характеристики аппроксимируются несколькими прямыми отрезками, то переходный процесс строится по участкам, при этом конечное значение переменной на предыдущем участке является начальным значением для следующего участка.**

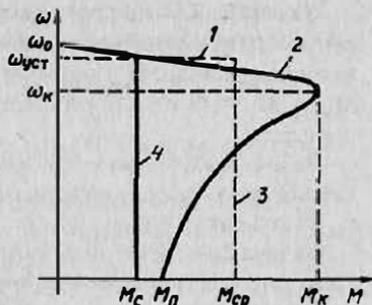


Рис. 2.12

**Задача 2.16\*.** Оценить (приближенно) время пуска асинхронного двигателя, механическая характеристика которого представлена на рис. 2.12, при следующих данных:  $\omega_{уст} = 150$  рад/с;  $J = 0,1$  кг·м<sup>2</sup>;  $M_k = 220$  Н·м;  $M_n = 180$  Н·м;  $M_c = 100$  Н·м.

Поскольку условием допускается приближенное решение, выполним аппроксимацию механической характеристики 2 асинхронного двигателя двумя прямыми: горизонтальной 1, проходящей через точку  $\omega_{уст} = 150$  рад/с, и вертикальной 3, проходящей через точку  $M_{ср} = (M_n + M_k)/2 = (180 + 220)/2 = 200$  Н·м.

Для полученной расчетной характеристики двигателя теперь можно применить формулы из разд. 2.5, поскольку динамический момент при пуске будет постоянным. Тогда время пуска

$$t_{пуск} = t_{п.л} = J(\omega_{уст} - 0) / (M_{ср} - M_c) = 0,1 \cdot 150 / (200 - 100) = 0,15 \text{ с.}$$

**Точное интегрирование уравнения движения** используется в тех случаях, когда моменты двигателя и исполнительного органа заданы аналитически (в виде формул) как функции скорости, положения или времени. Нахождение зависимостей  $\omega(t)$  и  $M(t)$  осуществляется подстановкой этих формул в уравнение (2.15) и его решением, которое является теоретически точным.

**Задача 2.17\*.** Механическая характеристика асинхронного двигателя (см. рис. 2.12) описывается уравнением

$$M = 2M_k / (s/s_k + s_k/s), \quad (2.34)$$

где  $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$  – текущее скольжение;  $s_k = (\omega_0 - \omega_k) / \omega_0$  – критическое скольжение, соответствующее критическим (максимальным) моменту  $M_k$  и скорости  $\omega_k$ ;  $\omega_0$  – скорость идеального холостого хода двигателя (скорость вращения его магнитного поля).

Получить точные выражения для зависимостей  $\omega(t)$  или  $s(t)$  и времени переходного процесса для случая  $M_c = \text{const}$ .

Подставив в (2.15) уравнение (2.34) и, учитывая, что  $d\omega = -\omega_0 ds$ , получим исходное дифференциальное уравнение относительно скольжения  $s$ :

$$2M_k / (s/s_k + s_k/s) - M_c = -J\omega_0 ds/dt. \quad (2.35)$$

Интегрирование (2.35) приводит к получению искомой зависимости  $s(t)$  (см. [4]).

**Задача 2.18.** Момент двигателя изменяется во времени по закону  $M = 100 - 15t$ . При этом постоянный момент нагрузки  $M_c = 40$  Н·м; приведенный к валу двигателя момент инерции  $J = 1,5$  кг·м<sup>2</sup>; начальная скорость двигателя  $\omega_{нач} = 20$  рад/с.

Получить зависимость  $\omega(t)$  и определить время, при котором скорость  $\omega_{кон} = 120$  рад/с.

**Методы численного интегрирования уравнения движения.** Во многих случаях, когда механические характеристики двигателя и исполнительного органа заданы графически или в виде таблиц, целесообразно применять для решения разработанные в математике численные методы интегрирования дифференциальных уравнений, к которым и относится уравнение механического движения ЭП (2.16). Наиболее простым из них является метод Эйлера, сущность которого рассмотрим на следующем примере.

**Задача 2.19\*.** Получить, используя численный метод Эйлера, зависимости  $\omega(t)$  и  $M(t)$  при пуске двигателя. Механические характеристики двигателя 1 и исполнительного органа 2 приведены на рис. 2.13, а. Момент инерции ЭП при этом  $J = 0,2$  кг·м<sup>2</sup>.

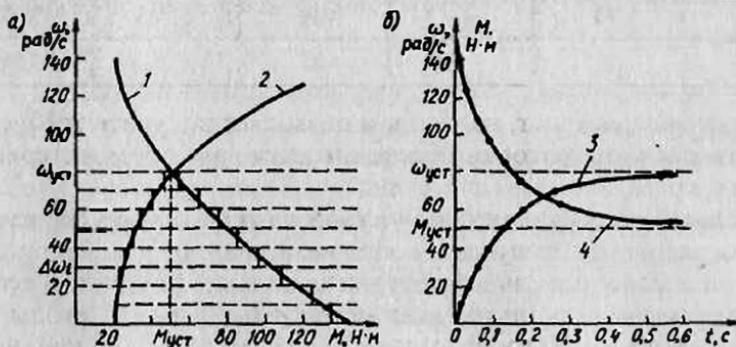


Рис. 2.13

Используем численный метод Эйлера, т.е. заменим в уравнении (2.16) дифференциалы переменных на их конечные приращения и запишем:

$$\Delta t = J\Delta\omega / (M - M_c). \quad (2.36)$$

Для расчета кривых  $\omega(t)$  и  $M(t)$  ось скорости разобьем на ряд интервалов (приращений)  $\Delta\omega$ , (в данном случае на 8), значения которых занесем в табл. 2.1 (отметим при этом, что интервалы скорости могут быть как одинаковыми, так и различными по значению).

Складывая скорости на предыдущем интервале  $\omega_{i-1}$  и приращения  $\Delta\omega_i$ , найдем текущие значения скорости  $\omega$ .

По механическим характеристикам графически на каждом интервале скорости определим средние значения моментов двигателя  $M_i$  и исполнительного органа  $M_{cr}$ .

По формуле (2.36) для каждого интервала скорости рассчитаем соответствующий интервал времени  $\Delta t_i$ . Складывая последовательно рассчитанные интервалы времени, получим текущее значение времени переходного процесса  $t_i$ .

Используя данные табл. 2.1, построим зависимости переходного процесса  $\omega(t)$  – кривая 3 и  $M(t)$  – кривая 4 на рис. 2.13, б.

Таблица 2.1

$\Delta\omega$ , рад/с	$\omega = \omega_{i-1} + \Delta\omega_i$ , рад/с	$M_i$ , Н·м	$M_{cr}$ , Н·м	$\Delta t_i$ , с	$t_i = t_{i-1} + \Delta t_i$ , с
10	10	136	20	0,015	0,015
10	20	124	21	0,020	0,035
10	30	108	22	0,023	0,058
10	40	96	25	0,028	0,086
10	50	84	29	0,036	0,124
10	60	74	34	0,050	0,174
10	70	64	40	0,083	0,257
10	80	54	47	0,0286	0,543

Метод Эйлера прост, нагляден и позволяет получать требуемую точность расчета, которая обеспечивается выбором интервалов скорости.

**Графоаналитические методы построения кривых переходного процесса** используются в случаях, когда механические характеристики двигателя и исполнительного органа заданы графически. В теории ЭП разработано несколько таких методов (например, методы площадей и пропорций), основанных также на решении уравнения (2.16). Подробно эти методы рассмотрены в [1, 2, 4].

**Задача 2.20.** Для изображенных на рис. 2.12 механических характеристик АД 2 и исполнительного органа 4 качественно изобразить изменение во времени скорости  $\omega(t)$  и момента  $M(t)$  двигателя при его пуске.

### Контрольные вопросы

1. Какие элементы относятся к механической части ЭП?
2. Запишите уравнения, описывающие поступательное и вращательное движения механических элементов.

3. Какое движение называется установившимся и какое неустановившимся?
4. Для чего выполняется операция приведения?
5. Поясните особенности расчета приведенного момента нагрузки при различных направлениях потока энергии в механической части ЭП.
6. Поясните правило определения знаков моментов в уравнении движения.
7. Что такое динамический момент ЭП?
8. Чем обусловлено использование многомассовых расчетных схем ЭП?
9. Приведите примеры механических характеристик двигателя и исполнительного органа.
10. Что такое жесткость механической характеристики?
11. Как с помощью механических характеристик двигателя и исполнительного органа определить скорость установившегося движения?
12. Как можно оценить устойчивость движения?
13. В каких случаях возникает неустановившееся движение ЭП?
14. Какова цель рассмотрения неустановившегося движения?
15. Какими уравнениями описывается неустановившееся движение?
16. Что такое динамический момент ЭП?
17. От каких факторов может в общем случае зависеть динамический момент ЭП?
18. Поясните физический смысл электромеханической постоянной времени и способ ее определения по кривым переходного процесса.
19. Назовите методы получения кривых переходного процесса при произвольном характере динамического момента ЭП.

### Глава 3. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для обеспечения требуемых режимов работы машин, производственных механизмов и самого ЭП некоторые переменные, которые характеризуют их работу, должны регулироваться. Такими переменными, часто называемыми в ЭП координатами, являются, например, 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. И, наконец, 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

Регулирование скорости движения исполнительных органов требуется во многих рабочих машинах и механизмах – прокатных станках, 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 (см. рис. 1.1), скорости двигателя и ИО при его вращательном или поступательном движении связаны между собой соотношениями

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

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

В первом случае воздействие заключается в изменении передаточного числа  $i$  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). Применяется механический способ ограничено из-за сложности автоматизации таких технологических процессов, малого набора регулируемых механических передач указанного типа и их невысокой 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.

Для примера на рис. 3.1 показаны естественная механическая характеристика 1 двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТНВ) и две искусственные – при введении в цепь якоря добавочного резистора с сопротивлением  $R_d$  (прямая 2) и уменьшении подаваемого на якорь напряжения (прямая 3). Обе эти искусственные характеристики обеспечивают при моменте нагрузки  $M_c$  снижение скорости до требуемого уровня  $\omega_n$ . Увеличение скорости ДПТНВ выше номинальной может быть получено за счет уменьшения его магнитного потока.

Для количественной оценки и сопоставления различных способов регулирования скорости используются следующие показатели.

*Диапазон регулирования скорости*, определяемый отношением максимальной скорости к минимальной, т. е.  $D = \omega_{\max} / \omega_{\min}$ .

В соответствии же с рис. 3.1 диапазон регулирования будет определяться отношением  $\omega_{\text{ном}} / \omega_n$  при заданном моменте нагрузки  $M_c$ .

*Стабильность скорости*, характеризуемая изменением скорости при возможных колебаниях момента нагрузки на валу двигателя и определяемая жесткостью его механических характеристик. Чем она больше, тем стабильнее скорость при изменениях момента нагрузки, и наоборот. В рассматриваемом примере большая стабильность обеспечивается при искусственной характеристике 3.

*Плавность регулирования скорости*, определяемая перепадом скорости при переходе с одной искусственной характеристики на другую.

Чем больше в заданном диапазоне регулирования скорости может быть получено искусственных характеристик, тем плавнее будет происходить регулирование скорости.

*Направление регулирования скорости*. В зависимости от способа воздействия на двигатель и вида получаемых искусственных характеристик его скорость может увеличиваться или уменьшаться по сравнению с работой на естественной характеристике при данном моменте нагрузки. В первом

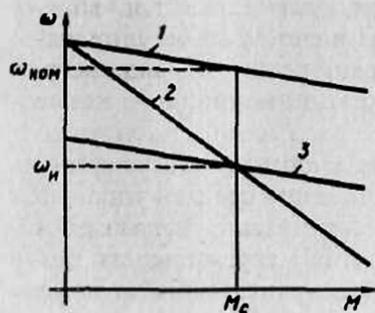


Рис. 3.1

случае говорят о регулировании скорости вверх от основной характеристики, во втором – вниз. Можно сказать, что регулирование скорости вверх связано с получением искусственных механических характеристик, располагающихся выше естественной, а регулирование скорости вниз обеспечивается характеристиками, располагающимися ниже естественной.

*Допустимая нагрузка двигателя.* 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.

*Экономичность регулирования скорости.* Получение одних и тех же показателей (диапазона, стабильности, плавности и т. д.) можно обеспечить с помощью различных ЭП и способов регулирования их скорости. Для выбора наиболее рационального вида регулируемого ЭП используются различные технико-экономические показатели – капитальные затраты на его реализацию, эксплуатационные расходы, срок окупаемости, надежность, удобство и простота в эксплуатации, серийность и унификация средств управления и др. Оценка или сопоставление экономических показателей проводится при выборе возможных способов регулирования скорости данного ЭП (или различных ЭП). В результате анализа всех возможных вариантов выявляется экономически обоснованное решение.

Обычно сопоставление вариантов регулируемого ЭП производится по капитальным затратам и эксплуатационным расходам с учетом срока окупаемости. Если капитальные затраты на реализацию ЭП окупаются за счет сокращения расходов при его эксплуатации за заданный срок, то такое техническое решение считается экономически обоснованным. С этой же целью могут использоваться и другие технико-экономические показатели.

Подчеркнем, что сопоставление и экономическая оценка различных способов регулирования скорости и тем самым регулируемых ЭП правомочны только в том случае, когда все они обеспечивают заданные технические характеристики рабочей машины или механизма.

### 3.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ МОМЕНТА И ТОКА

При формировании заданного графика движения исполнительных органов часто бывает необходимо обеспечивать требуемое их ускорение или замедление. В соответствии с выражениями (2.3) и (2.4) 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.

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

где  $k$  – конструктивный коэффициент двигателя.

Таким образом, изменяя ток якоря  $I$  или магнитный поток  $\Phi$ , можно регулировать (ограничивать) момент.

Регулирование тока и момента двигателей требуется 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  $3I_{ном}$ . 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. 3.2, 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.

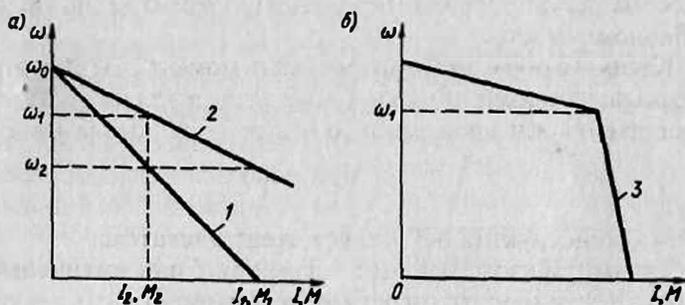


Рис. 3.2

Изображенная на рис. 3.2, 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 регулирования 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 подач 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 лутевых 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. 3.3). Такой типовой график движения

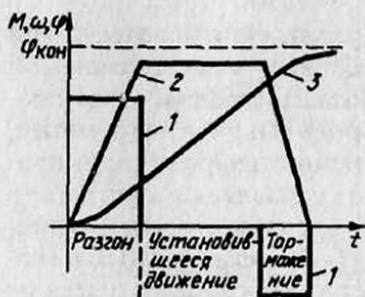


Рис. 3.3

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  $\omega(t)$ . 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. 3.4).

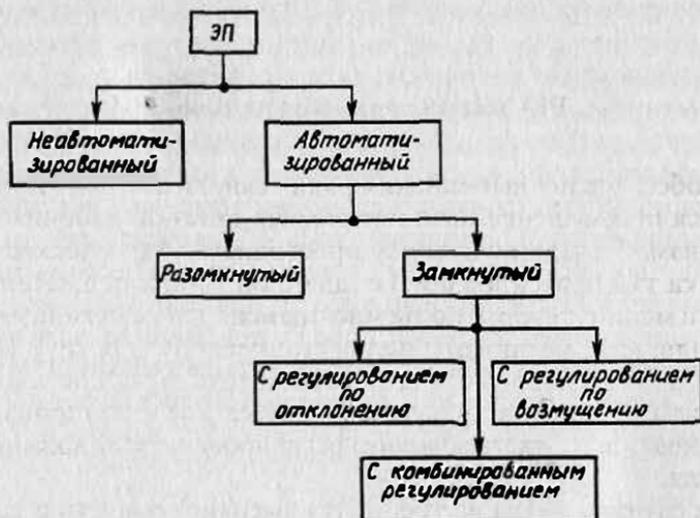


Рис. 3.4

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 (см. рис. 1.1). 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 позволяет освободить человека от утомительного и однообразного труда, повысить производительность рабочих машин и механизмов, а также качество выполняе-

мых 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. Конкретные схемы разомкнутых ЭП рассматриваются в гл. 10.

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.

#### Контрольные вопросы

1. Какие координаты (переменные) ЭП регулируются при управлении движением исполнительного органа?
2. Какими способами может осуществляться регулирование координат ЭП?
3. Какими показателями оценивается регулирование скорости?
4. В каких случаях и каким образом регулируется момент двигателя?
5. В каких случаях возникает необходимость регулирования (ограничения) тока двигателя?
6. В чем сущность регулирования положения ЭП?
7. Поясните структурное построение ЭП.
8. Какие существуют принципы построения замкнутых ЭП?
9. Назовите виды обратных связей.
10. Что такое автоматизированный ЭП?

## Глава 4. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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

Электроприводы с ДПТНВ являлись до недавнего времени основным видом регулируемого ЭП. Созданные на базе системы «управляемый выпрямитель – двигатель» (УВ – Д) замкнутые ЭП обеспечивают регулирование координат движения исполнительных органов рабочих машин 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.

#### 4.1. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ И СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Основная схема включения ДПТНВ представлена на рис. 4.1, а, где приняты следующие обозначения:  $I, I_a$  – соответственно токи в цепях обмоток якоря и возбуждения, А;  $E$  – ЭДС якоря, В;  $\omega$  и  $M$  – соответственно угловая скорость, рад/с, и момент, Н·м, двигателя;  $R_a = r_{о.я} + r_{дп} + r_{к.о} + r_{щ}$  – сопротивление якоря, состоящее из сопротивлений обмотки якоря, добавочных полюсов, компенсационной обмотки и щеточного контакта, Ом;  $R_{о.в}$  – сопротивление обмотки возбуждения (ОВ), Ом;  $L_a$  и  $L_{о.в}$  – соответственно индуктивности

обмоток якоря и возбуждения, Гн. На схеме показаны добавочные резисторы в цепях обмоток якоря  $R_d$  и возбуждения  $R_b$ , а также отдельные источники питания обмоток якоря и возбуждения с напряжениями соответственно  $U$  и  $U_b$ .

При выводе уравнений для статических характеристик двигателя примем следующие допущения: реакция якоря не учитывается; момент на валу двигателя равен электромагнитному моменту. Тогда уравнения для напряжения, ЭДС якоря и электромагнитного момента будут иметь вид

$$U = E + IR; \quad (4.1)$$

$$E = k\Phi\omega; \quad (4.2)$$

$$M = k\Phi I, \quad (4.3)$$

где  $R = R_a + R_n$  – полное сопротивление цепи якоря, Ом;  $\Phi$  – магнитный поток, Вб;  $U$  – подводимое к якорю напряжение, В;  $k = pN/(2\pi a)$  – конструктивный коэффициент двигателя;  $p$  – число пар полюсов;  $N$  – число активных проводников обмотки якоря;  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Подставляя (4.2) в (4.1), получим формулу для электромеханической характеристики  $\omega(I)$ :

$$\omega = (U - IR)/(k\Phi). \quad (4.4)$$

Формулу для механической характеристики  $\omega(M)$  ДПТНВ получим из (4.4) с использованием выражения (4.3):

$$\omega = U/(k\Phi) - MR_a/(k\Phi)^2. \quad (4.5)$$

В соответствии с (4.4) и (4.5) электромеханическая и механическая характеристики ДПТНВ представляют собой линейные зависимости угловой скорости (далее скорости) от тока и момента, вид которых для разных полярностей питающего якоря напряжения показан на рис. 4.1, б. Здесь электромеханическая и механическая ха-

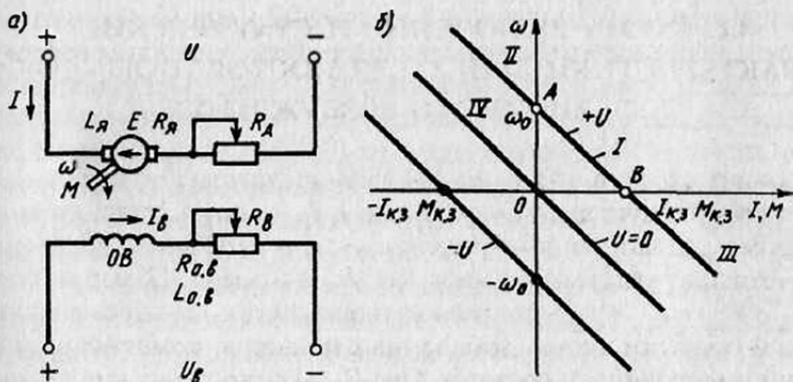


Рис. 4.1

рактические совмещены, что в соответствии с (4.3) справедливо в случае  $k\Phi = \text{const}$ . Их характерными точками являются точка  $A$  холостого хода, в которой  $\omega = \omega_0$ , а  $I = M = 0$ , и точка  $B$  короткого замыкания, где  $\omega = 0$ , а  $I = I_{к.з}$  и  $M = M_{к.з}$ . Отметим, что режим короткого замыкания для электрической машины соответствует неподвижному состоянию якоря при поданном на двигатель напряжении, а не замыканию его электрических цепей между собой или на корпус. Режим короткого замыкания называется также пусковым режимом, поскольку является начальным при включении (пуске) двигателя.

Уравнения (4.4) и (4.5) можно записать в сокращенной форме:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (4.6)$$

где  $\omega_0$  – скорость идеального холостого хода двигателя,

$$\omega_0 = U / (k\Phi); \quad (4.7)$$

$\Delta\omega$  – изменение угловой скорости относительно скорости идеального холостого хода,

$$\Delta\omega = IR / (k\Phi) = MR / (k\Phi)^2. \quad (4.8)$$

На рис. 4.1, б показана также характеристика ДПТНВ, уравнения которой получают из (4.4) и (4.5) при  $U = 0$ :

$$\omega = -IR / (k\Phi); \quad (4.9)$$

$$\omega = -MR / (k\Phi)^2. \quad (4.10)$$

Зависимости  $\omega(I)$  и  $\omega(M)$  при  $U = 0$  также являются линейными. Схема динамического торможения, при котором ДПТНВ имеет такую характеристику, приведена на рис. 4.2. (она может называться также схемой генератора, работающего на автономную нагрузку  $R_d$ ).

Выражения (4.4) и (4.5) позволяют назвать основные способы реализации искусственных характеристик ДПТНВ, используемых для регулирования координат ЭП. К ним относятся изменение сопротивления добавочного резистора в цепи якоря  $R_r$ , магнитного потока  $\Phi$  и подводимого к якорю напряжения  $U$ . Отметим, что значения входящих в эти выражения тока и момента определяются только механической нагрузкой двигателя  $M_c$  и не могут быть установлены произвольно.

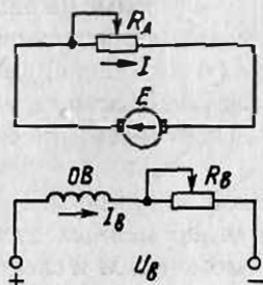


Рис. 4.2

Задача 4.1\*. Рассчитать и построить естественные характеристики ДПТНВ, используя следующие его паспортные (номинальные) данные:  $P_{\text{ном}} = 300$  кВт;  $U_{\text{ном}} = 440$  В;  $n_{\text{ном}} = 1250$  об/мин;  $I_{\text{ном}} = 750$  А.

Для построения характеристик, представляющих собой прямые линии, достаточно рассчитать координаты двух точек: номинального режима и холостого хода.

Найдем номинальные скорость и момент двигателя:

$$\omega_{\text{ном}} = 2\pi n_{\text{ном}} / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1250 / 60 = 131 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 300\,000 / 131 = 2306 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Предварительно определим по (4.3)

$$kF_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} / I_{\text{ном}} = 2306 / 750 = 3,08 \text{ В}\cdot\text{с},$$

тогда скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = U_{\text{ном}} / (kF_{\text{ном}}) = 440 / 3,08 = 144 \text{ рад/с}.$$

По координатам точек холостого хода ( $\omega = \omega_0$ ,  $I = M = 0$ ) и номинального режима ( $\omega = \omega_{\text{ном}}$ ,  $I = I_{\text{ном}}$ ,  $M = M_{\text{ном}}$ ) построим естественные электромеханическую  $\omega(I)$  и механическую  $\omega(M)$  характеристики.

Задача 4.2. Рассчитать и построить характеристики  $\omega(I)$  и  $\omega(M)$  при динамическом торможении и добавочном сопротивлении цепи якоря  $R_d = 0,01$  Ом. Номинальные данные ДПТНВ см. в задаче 4.1.

## 4.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Электрическая машина обладает так называемым свойством обратимости, т.е. она может работать как двигателем, преобразуя электрическую энергию в механическую, так и генератором, осуществляя обратное преобразование энергии. При этом переход из одного режима в другой может происходить без изменения схемы включения. При работе двигателей в генераторном режиме на валу электрической машины создается тормозной момент, обеспечивающий интенсивное принудительное замедление (торможение) движения ЭП и, следовательно, расширяющий его возможности по управлению движением исполнительного органа (в частности, при его торможении и реверсе).

Энергетический режим работы электрической машины можно определить исходя из взаимных направлений двух переменных: электрических (ЭДС  $E$  и тока  $I$ ) или механических (момента  $M$  и скорости  $\omega$ ). При одинаковых направлениях скорости и момента и разных направлениях тока и ЭДС имеет место двигательный режим

работы, а при противоположных направлениях скорости и момента и одинаковых направлениях ЭДС и тока – генераторный. Граничными между двигательным и генераторным являются режимы холостого хода и короткого замыкания, в которых одна электрическая и одна механическая переменные равны нулю. При холостом ходе нулю равны ток и момент, а при коротком замыкании – ЭДС и скорость.

Рассмотрим режимы работы двигателя (рис. 4.3) на различных участках его характеристик (см. рис. 4.1, б) при положительной полярности напряжения  $U$ .

*Режим холостого хода* (точка А). Двигатель не получает энергии ни из электрической сети (за исключением электроэнергии на возбуждение), ни с вала. В этом режиме  $I = 0$ ,  $E = U = k\Phi\omega_0$ ,  $M = 0$ ,  $\omega = \omega_0$  (см. рис. 4.3, а).

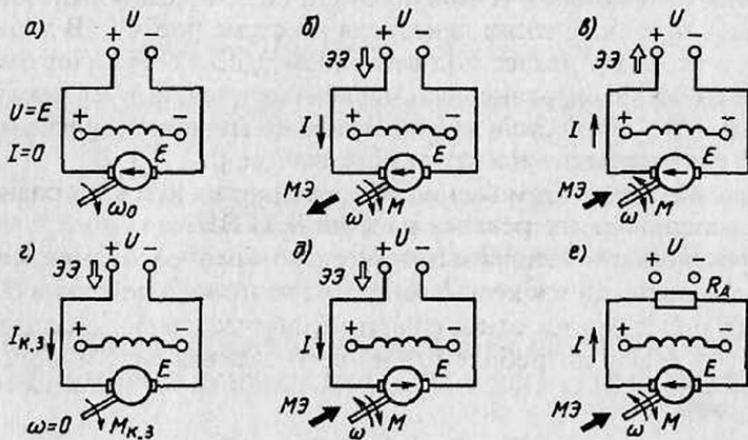


Рис. 4.3

*Двигательный режим* (участок I характеристики на рис. 4.1, б) в диапазоне  $0 < \omega < \omega_0$ , т. е. в первом квадранте, где  $\omega$  и  $M$  совпадают по направлению. В этом режиме  $E < U$ , ток  $I = (U - E)/R$  совпадает по направлению с напряжением  $U$  и не совпадает с ЭДС, электрическая энергия (ЭЭ) поступает из сети, а механическая энергия (МЭ) с вала двигателя передается исполнительному органу (см. рис. 4.3, б).

*Генераторный режим работы параллельно с сетью* или торможение с рекуперацией энергии в сеть (участок II характеристики на рис. 4.1, б). На этом участке  $\omega > \omega_0$ , поэтому ЭДС больше напряжения сети, ток и момент изменяют свои направления на противоположные. Двигатель получает механическую энергию от рабочей машины и отдает ее (рекуперировать) в виде электроэнергии в сеть (см. рис. 4.3, в).

*Режим короткого замыкания* возникает при  $\omega = 0$  и  $E = 0$ . В этом режиме, согласно (4.1)  $I = I_{к.з} = U/R$ , электрическая энергия, поступающая из сети, рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи. Механическая энергия с вала ДПТ не отдается, так как  $\omega = 0$  (см. рис. 4.3, з).

*Режим генератора при его последовательном соединении с сетью* или торможение противовключением наступает при  $\omega < 0$  (участок III характеристики на рис. 4.1, б). За счет изменения направления скорости ЭДС также меняет свою полярность. Ток в якоре совпадает по направлению с напряжением и ЭДС и определяется их суммарным действием, т. е.  $I = (U + E)/R$ . В результате электроэнергии, поступающая из сети и вырабатываемая самим двигателем за счет механической энергии рабочей машины, рассеивается в виде тепла в резисторах цепи якоря (см. рис. 4.3, д).

*Режим автономного генератора* или динамическое торможение возникает при включении двигателя по схеме рис. 4.2. В этом случае ток в якоре протекает под действием ЭДС и совпадает с ней по направлению. Электроэнергия вырабатывается за счет поступающей с вала механической энергии рабочей машины и рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи (см. рис. 4.3, е).

Таким образом, торможение ЭП реализуется при трех разновидностях генераторного режима работы ДПТНВ.

Эффективность электромеханического преобразования энергии двигателя оценивается коэффициентом полезного действия (КПД), который определяется отношением механической мощности на его валу  $P_{\text{мех}} = M\omega$  к потребляемой из сети электрической мощности  $P_{\text{эл}} = UI + U_{\text{в}}I_{\text{в}}$ :

$$\eta = P_{\text{мех}}/P_{\text{эл}} = P_{\text{мех}}/(P_{\text{мех}} + \Delta P),$$

где  $\Delta P$  – потери мощности в двигателе.

### 4.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РЕЗИСТОРОВ В ЦЕПИ ЯКОРЯ

Этот способ применяется при невысоких требованиях к показателям качества регулирования скорости, отличаясь в то же время универсальностью и простотой реализации (см. рис. 4.1, а).

Из (4.7) видно, что скорость  $\omega_0$  не зависит от  $R_{\text{д}}$ , а наклон характеристик, как это следует из (4.8), тем больше, чем больше  $R_{\text{д}}$ . Этот краткий анализ позволяет изобразить семейство механических (электромеханических) характеристик ДПТНВ в виде совокупности ли-

ний (рис. 4.4) различного наклона (жесткости), проходящих через одну и ту же точку на оси скорости с ординатой  $\omega_0$ . Характеристика 1 соответствует случаю, когда  $R_d = 0$  и является естественной, искусственные характеристики 2... 4 построены при наличии в цепи якоря резисторов с сопротивлениями соответственно  $R_{д1} < R_{д2} < R_{д3}$ .

Оценим данный способ регулирования скорости по основным показателям, рассмотренным в разд. 3.1. Диапазон регулирования скорости небольшой (обычно 2... 3). Причина этого заключается в снижении жесткости характеристик по мере увеличения  $R_d$ . Направление регулирования скорости – вниз от естественной характеристики. Плавность регулирования скорости определяется характером изменения  $R_d$ . Если это сопротивление изменяется плавно, то данный способ обеспечивает плавное регулирование скорости. Чаше же рассматриваемый способ обеспечивает ступенчатое регулирование скорости. Стабильность скорости снижается по мере увеличения диапазона регулирования, так как уменьшается жесткость регулировочных характеристик.

Экономичность регулирования скорости оценим, сопоставив требуемые капитальные затраты на реализацию данного способа и стоимость потерь мощности при регулировании. Капитальные затраты на приобретение добавочных резисторов небольшие, так как их стоимость невелика. В то же время потери мощности и соответственно непроизводительный расход ЭП электрической энергии и ее стоимость оказываются существенными. Покажем это, оценив потери мощности в цепи якоря – основную долю потерь в двигателе.

Потери мощности в цепи якоря  $\Delta P_{я}$  определяются разностью мощностей: потребляемой из сети  $P_1 = P_{эл} = UI$  и полезной механической на валу  $P_2 = P_{мех} = M\omega$ . С учетом соотношений (4.3) и (4.7)

$$\Delta P_{я} = UI - M\omega = k\Phi\omega_0 I - k\Phi I\omega = k\Phi\omega_0 I (\omega_0 - \omega) / \omega_0 = P_1 \delta, \quad (4.11)$$

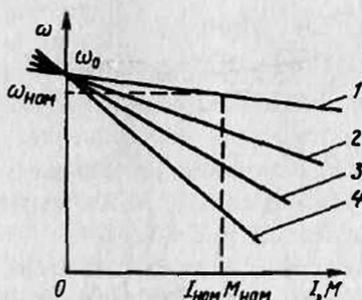


Рис. 4.4

где  $\delta = (\omega_0 - \omega) / \omega_0 = \Delta\omega / \omega_0$  – относительный перепад скорости.

Из (4.11) видно, что уже при снижении скорости в два раза по сравнению со скоростью идеального холостого хода  $\omega_0$ , т. е. при  $\delta = 0,5$  и  $D \approx 2$ , половина всей потребляемой из сети мощности  $P_1$  теряется в якоре двигателя – КПД двигателя не превышает 50%. При дальнейшем увеличении диапазона регулирования КПД снижается в еще большей степени.

Допустимая нагрузка при работе двигателя на искусственных характеристиках определяется по предельно допустимому моменту, который он может развивать, не перегреваясь выше нормы. Так как при данном способе регулирования магнитный поток не изменяется и равен номинальному, то при подстановке в (4.3)  $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$  и  $I = I_{\text{ном}}$  получим:

$$M_{\text{доп}} = k\Phi_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = M_{\text{ном}}. \quad (4.12)$$

Выражение (4.12) показывает, что при рассматриваемом способе регулирования скорости ДПТНВ может без перегрева работать на любой искусственной характеристике с моментом нагрузки, равным номинальному. Отметим, что способы регулирования скорости, при которых  $M_{\text{доп}} = M_{\text{ном}}$ , в теории ЭП называются регулированием скорости при постоянном моменте.

Сделанный вывод о характере допустимой нагрузки справедлив для ДПТНВ, у которых охлаждение не ухудшается по мере снижения скорости. В тех же случаях, когда ДПТНВ охлаждается с помощью вентилятора на своем валу, момент нагрузки при снижении скорости необходимо также уменьшить из-за ухудшения вентиляции двигателя.

Для регулирования скорости движения исполнительных органов рассмотренный способ используется при небольших диапазонах регулирования или кратковременной работе двигателя на пониженных скоростях.

#### 4.4. РАСЧЕТ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ В ЦЕПИ ЯКОРЯ

В теории ЭП разработано несколько методов расчета регулировочных резисторов в цепи якоря.

Допустим, что известна естественная электромеханическая или механическая характеристика 1 двигателя (рис. 4.5) и его паспортные данные. Требуется рассчитать сопротивление резистора  $R_d$ , при включении которого в цепь якоря желаемая искусственная характеристика 2 пройдет через точку А с заданными координатами  $(\omega_n, I_n)$  или  $(\omega_n, M_n)$ . Отметим, что эта реостатная характеристика может быть задана как по условиям регулирования скорости, так и для ограничения тока и момента двигателя в переходных процессах.

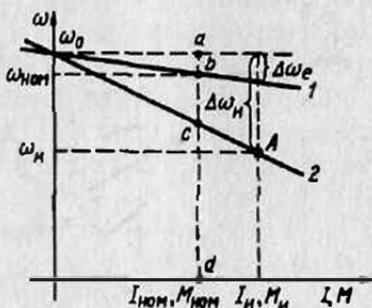


Рис. 4.5

Метод пропорций основан на использовании формулы (4.8) для определения перепада скорости. Запишем отношение перепадов скорости при токе  $I_{\text{я}}$  и (или) моменте  $M_{\text{я}}$  на естественной  $\Delta\omega_{\text{е}}$  и желаемой искусственной  $\Delta\omega_{\text{и}}$  характеристиках:

$$\Delta\omega_{\text{е}}/\Delta\omega_{\text{и}} = I_{\text{я}}R_{\text{я}}/(I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})) = R_{\text{я}}/(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}), \quad (4.13)$$

откуда

$$R_{\text{д}} = R_{\text{я}}(\Delta\omega_{\text{и}}/\Delta\omega_{\text{е}} - 1). \quad (4.14)$$

Полученная формула позволяет рассчитать сопротивление добавочных резисторов при расположении заданной точки в любом квадранте.

Метод отрезков в отличие от метода пропорций не требует использования данных о собственном сопротивлении якоря двигателя, которое не всегда указывается в паспорте, а позволяет определить его по известной естественной характеристике.

Для получения расчетной формулы этого метода запишем согласно (4.4) выражение для скорости ДПТ на заданной искусственной характеристике (см. рис. 4.5) при номинальных токе, моменте, магнитном потоке и напряжении:

$$\omega_{\text{и}} = U_{\text{ном}}/(k\Phi_{\text{ном}})(1 - I_{\text{ном}}R/U_{\text{ном}}), \quad (4.15)$$

или с учетом (4.7)

$$\omega_{\text{и}} = \omega_0(1 - R/R_{\text{ном}}), \quad (4.16)$$

где  $R_{\text{ном}} = U_{\text{ном}}/I_{\text{ном}}$  — так называемое номинальное сопротивление, являющееся базовой величиной при расчетах, Ом.

Из (4.16) получим соотношение

$$R/R_{\text{ном}} = (\omega_0 - \omega_{\text{и}})/\omega_0 = \delta, \quad (4.17)$$

которое отражает важное свойство ДПТНВ: относительный перепад скорости  $\delta = \Delta\omega/\omega_0$  равен относительному активному сопротивлению цепи якоря  $R/R_{\text{ном}}$ . Отметим, что это свойство характерно и для других типов двигателей (в частности, асинхронных).

Соотношение (4.17) удобно решать с помощью характеристик, приведенных на рис. 4.5, где  $a, b, c, d$  — характерные точки. Отметим также, что  $(\omega_0 - \omega_{\text{и}}) = \Delta\omega = ac$ ,  $\omega_0 = ad$ . Тогда

$$R = R_{\text{ном}}\Delta\omega/\omega_0 = R_{\text{ном}}ac/ad; \quad (4.18)$$

$$R_{\text{д}} = R_{\text{ном}}bc/ad; \quad (4.19)$$

$$R_{\text{я}} = R_{\text{ном}}ab/ad. \quad (4.20)$$

Таким образом, для нахождения  $R_d$  следует сначала по характеристикам двигателя определить длину отрезков  $bc$  и  $ad$  при номинальном токе или моменте, рассчитать номинальное сопротивление  $R_{ном} = U_{ном}/I_{ном}$ , а затем воспользоваться формулой (4.19).

При расчете регулировочных резисторов в большинстве случаев необходимо знать собственное сопротивление якоря  $R_я$ , которое можно определить по каталогам, найти в справочной литературе (например, в [24], где приводятся обобщенные зависимости относительного сопротивления якоря  $R_я^* = R_я/R_{ном}$  от мощности  $P_{ном}$ ) или экспериментально посредством измерения сопротивления между щетками двигателя, рассчитать по приближенной формуле для номинальных паспортных данных:

$$R_я \approx 0,5U_{ном}(1 - \eta_{ном})/I_{ном} = 0,5R_{ном}(1 - \eta_{ном}), \quad (4.21)$$

где  $\eta_{ном}$  — номинальный КПД двигателя, а при наличии экспериментально полученной электромеханической или механической характеристики по методу отрезков с помощью формул (4.3) и (4.4), записанных для точки номинального режима.

**Задача 4.3\*.** ДПТНВ типа ПБСТ-53 имеет следующие паспортные данные:  $P_{ном} = 4,8$  кВт;  $n_{ном} = 1500$  об/мин;  $U_{ном} = 220$  В;  $I_{ном} = 24,2$  А;  $R_я = 0,38$  Ом;  $I_{в.ном} = 0,8$  А. Определить сопротивление резистора, включение которого обеспечит прохождение искусственной характеристики через точку с координатами  $\omega_n = 90$  рад/с,  $M_n = 25$  Н·м.

Используем метод пропорций, предварительно определив номинальные скорость и момент двигателя:

$$\omega_{ном} = 2\pi n_{ном}/60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1500/60 = 157 \text{ рад/с};$$

$$M_{ном} = P_{ном}/\omega_{ном} = 4800/157 = 30,6 \text{ Н·м}.$$

Зная эти данные, найдем

$$k\Phi_{ном} = M_{ном}/I_{ном} = 30,6/24,2 = 1,3 \text{ В·с};$$

скорость холостого хода

$$\omega_0 = U_{ном}/(k\Phi_{ном}) = 220/1,3 = 169 \text{ рад/с};$$

перепад скорости на естественной характеристике при моменте  $M_n = 25$  Н·м

$$\Delta\omega_c = M_n R_я / (k\Phi_{ном})^2 = 25 \cdot 0,38 / 1,3^2 = 6 \text{ рад/с}$$

и перепад скорости на искусственной характеристике при том же моменте

$$\Delta\omega_n = \omega_0 - \omega_n = 169 - 90 = 79 \text{ рад/с}.$$

Теперь найдем сопротивление добавочного резистора по (4.14):

$$R_d = R_я(\Delta\omega_n/\Delta\omega_c - 1) = 0,38(79/6 - 1) = 4,62 \text{ Ом}.$$

**Задача 4.4.** Для условий задачи 4.3 найти сопротивление резистора методом отрезков.

**Задача 4.5.** Определить, каким должно быть сопротивление добавочного резистора по сравнению с сопротивлением якоря двигателя, чтобы перепад скорости при заданном токе увеличился в три раза.

#### 4.5. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА И МОМЕНТА ПРИ ПУСКЕ, ТОРМОЖЕНИИ И РЕВЕРСЕ

Выше уже говорилось о том, что ток в якоря ДПТНВ в переходных режимах не должен превосходить некоторых допустимых значений. В простейших случаях регулирование (ограничение) тока и тем самым момента осуществляется введением в цепь якоря добавочного резистора  $R_d$ . Характеристики двигателя для определения скачков тока и момента в переходных режимах приведены на рис. 4.6.

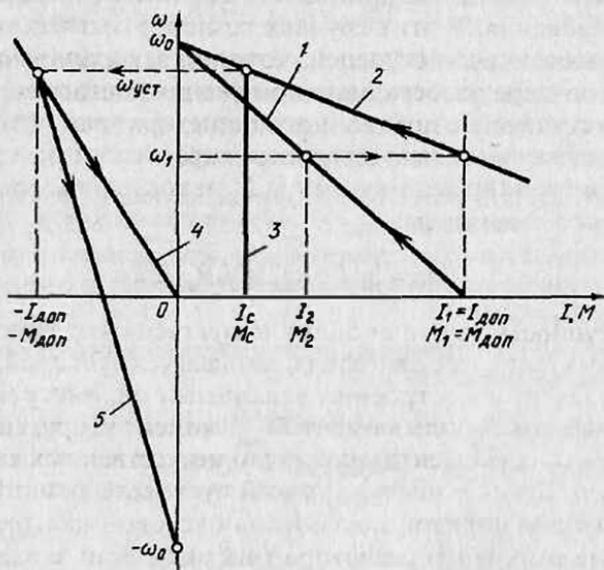


Рис. 4.6

Пуск двигателя сначала происходит по искусственной характеристике 1 с резистором  $R_d$  в цепи якоря, называемым пусковым. В момент включения двигателя его ток и момент ограничиваются до заданного (допустимого) уровня  $I_1 = I_{доп}$  и  $M_1 = M_{доп}$ . По мере увеличения скорости и соответственно ЭДС двигателя ток в якоря снижается, и при скорости  $\omega_1$  резистор может быть замкнут (выведен из цепи якоря). Двигатель переходит на работу по естественной характеристике 2, при этом броски тока и момента также не превышают заданного уровня. Завершается пуск двигателя после достижения им скорости  $\omega_{уст}$ , определяемой точкой пересечения характеристик двигателя 2 и исполнительного органа 3.

*Динамическое торможение*, реализуемое по схеме, приведенной на рис. 4.2, происходит по характеристике 4 (см. рис. 4.6) замыканием якоря на резистор  $R_d$ . Его сопротивление находится по заданным значениям  $I_{доп}$  или  $M_{доп}$ , определяемым замедлением ЭП или условиями коммутации двигателя.

*Реверс и торможение противовключением ДПТНВ*, осуществляемые изменением полярности напряжения якоря или обмотки возбуждения, происходят по характеристике 5 при включении в цепь якоря резистора  $R_d$ .

Иногда для регулирования тока и момента в цепь якоря вводится регулируемый резистор, что позволяет реализовать две или более искусственные характеристики, сузить пределы изменений тока и момента в переходных процессах и тем самым повысить точность их регулирования. В этих случаях резистор секционируется на соответствующее число ступеней, которые закорачиваются последовательно по мере разбега или торможения двигателя.

Число ступеней  $m$  добавочного резистора (или, что то же самое, число используемых искусственных характеристик) связано с пределами изменения тока в якоре  $I_1 = I_{доп}$  и током переключения  $I_2$  следующим соотношением:

$$m = \lg(I_2/I_1) / \lg(I_1 R_a / U). \quad (4.22)$$

Совокупность двух или более искусственных характеристик, используемых при пуске двигателя, называется пусковой диаграммой. При ее расчете и построении заданными параметрами являются: допустимые ток  $I_{доп}$  или момент  $M_{доп}$ , момент нагрузки  $M_c$ , пределы изменения тока (момента) или число искусственных характеристик  $m$ , соответствующее числу ступеней пускового резистора.

Рассмотрим порядок построения пусковой диаграммы и схему включения пускового резистора (рис. 4.7), если заданы  $I_{доп}$ ,  $M_c$  и

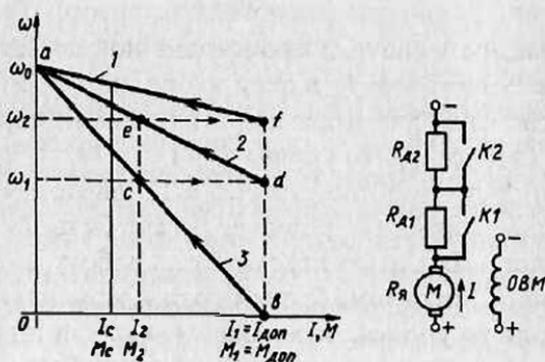


Рис. 4.7

число характеристик  $m = 2$  (отметим, что эти характеристики могут быть использованы и для регулирования скорости).

Сначала строится естественная характеристика 1 двигателя и проводится вертикальная линия, соответствующая абсциссе  $I_1 = I_{\text{доп}}$  или  $M_1 = M_{\text{доп}}$ . Через точки  $a$  и  $b$  с координатами  $(\omega_0, 0)$  и  $(0, I_1)$  проводится искусственная характеристика 3, соответствующая включению в цепь якоря обеих ступеней пускового резистора  $R_{\text{п1}}$  и  $R_{\text{п2}}$ . Затем определяется ток переключения по приближенному соотношению  $I_2 = (1, 1 \dots 1, 2) I_c$  и строится вертикальная линия, соответствующая этому току. Через точку  $c$  пересечения этой линии с характеристикой 3 проводится горизонтальная линия до пересечения в точке  $d$  с вертикалью, имеющей абсциссу  $I_1$ . Через точки  $a$  и  $d$  проводится искусственная характеристика 2, а через точку  $e$  — еще одна горизонталь до пересечения в точке  $f$  с естественной характеристикой 1.

Для точного попадания точек  $c, d, e, f$  на вертикали с абсциссами  $I_1$  и  $I_2$  производится подбор значения тока  $I_2$ .

Пуск двигателя начинается по характеристике 3. При скорости  $\omega_1$ , когда ток снизится до значения  $I_2$ , ключом  $K1$  закорачивается ступень  $R_{\text{п1}}$  и двигатель уже по характеристике 2 продолжает свой разбег. При скорости  $\omega_2$  ключом закорачивается ступень  $R_{\text{п2}}$  и двигатель начинает работать на естественной характеристике 1.

Для осуществления динамического торможения двигатель включается по схеме, приведенной на рис. 4.2, и при этом переходит с работы на характеристике 2 на работу по характеристике 4 (см. рис. 4.6).

Торможение противовключением, или реверс двигателя, осуществляется изменением полярности напряжения на якоре или обмотке возбуждения (последнее применяется очень редко). При этом двигатель переходит с работы по характеристике 2 на работу по характеристике 5 (см. рис. 4.6).

В качестве ключей для указанных переключений и шунтирования резисторов обычно используются контакторы. Релейно-контакторные схемы управления, обеспечивающие описанный порядок пуска ДПТ, рассмотрены в гл. 10.

Расчет сопротивлений резисторов, которые позволяют получать показанные на рис. 4.6 и 4.7 характеристики, производится по формулам (4.14) и (4.19). Кроме того, могут использоваться формулы, позволяющие непосредственно находить сопротивления по заданным (допустимым) току и моменту при пуске, торможении и реверсе. Исходным в этом случае является максимально допустимый ток  $I_{\text{доп}}$ , который определяется допустимым моментом  $M_{\text{доп}}$  или условиями пуска, реверса и торможения двигателя.

Сопротивление добавочного резистора при пуске в одну ступень (см. рис. 4.6) рассчитывается по (4.1) при  $E = 0$ :

$$R_d = U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}}. \quad (4.23)$$

Сопrotивление добавочного резистора при динамическом торможении

$$R_d = E/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}} \approx U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}}. \quad (4.24)$$

Сопrotивление добавочного резистора при реверсе или торможении противовключением

$$R_d = (U + E)/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}} \approx 2U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}}. \quad (4.25)$$

**Задача 4.6\***. Для двигателя типа ПБСТ-53 (см. задачу 4.3) определить сопротивление резисторов, включение которых ограничит ток при пуске и торможении противовключением до уровня  $I_{\text{доп}} = 3 I_{\text{ном}}$ .

Определим сопротивление пускового резистора по (4.23):

$$R_d = U/I_{\text{доп}} - R = 220/(3 \cdot 24,2) - 0,38 = 2,65 \text{ Ом.}$$

Сопrotивление резистора, используемого при торможении, определим по (4.25):

$$R_d = 2U/I_{\text{доп}} - R_{\text{я}} = (2 \cdot 220)/(3 \cdot 24,2) - 0,38 = 5,7 \text{ Ом.}$$

**Задача 4.7.** Для двигателя типа ПБСТ-53 (см. задачу 4.3) построить пусковую диаграмму при следующих условиях:  $m = 2$ ;  $I_{\text{доп}} = 2,8 I_{\text{ном}}$ ;  $M_e = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Рассчитать сопротивления добавочных резисторов.

**Задача 4.8.** Для двигателя типа ПБСТ-53 (см. задачу 4.3) определить число характеристик  $m$  пусковой диаграммы, при котором изменение тока будет происходить в пределах от  $I_1 = 60 \text{ А}$  до  $I_2 = 10 \text{ А}$ .

**Задача 4.9.** Рассчитать сопротивление резистора, при котором характеристика двигателя (см. задачу 4.3) в режиме динамического торможения пройдет через точку с координатами  $\omega_n = 100 \text{ рад/с}$ ,  $I_n = -20 \text{ А}$ .

#### 4.6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Изменение магнитного потока используется преимущественно для регулирования скорости. Этот способ находит широкое применение в ЭП вследствие простоты его реализации и экономичности, так как регулирование осуществляется в относительно маломощной цепи возбуждения двигателя и не сопровождается большими потерями мощности.

Магнитный поток при регулировании скорости обычно уменьшают по сравнению с номинальным (точка  $A$  на кривой намагничи-

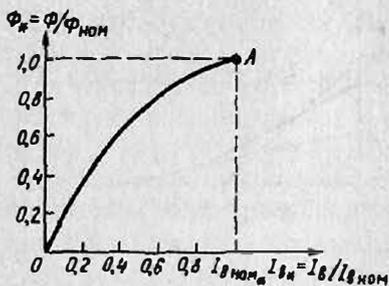


Рис. 4.8

вания рис. 4.8) за счет снижения тока возбуждения, так как его увеличение выше номинального вызывает дополнительный нагрев обмотки возбуждения. Кроме того, двигатель рассчитывается и конструируется таким образом, что бы его магнитная система была близка к насыщению, поэтому увеличение тока возбуждения не приводит к заметному увеличению магнитного потока.

Регулирование тока в цепи возбуждения может осуществляться или с помощью добавочного резистора  $R_b$  (рис. 4.9, а), или изменением напряжения питания обмотки возбуждения, например с помощью управляемого выпрямителя УВ (см. рис. 4.9, б), выходное напряжение которого  $U_b$  регулируется по сигналу управления  $U_y$ . Вторая схема применяется для регулирования в широких пределах тока возбуждения мощных двигателей, работающих в замкнутых структурах ЭП. При использовании в ней реверсивных управляемых выпрямителей обеспечивается также изменение направления тока возбуждения.

В соответствии с (4.7) уменьшение магнитного потока приводит к увеличению скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ . Ток короткого замыкания  $I_{к.з} = U/R_a$ , т.е. от магнитного потока не зависит и при его варьировании будет оставаться неизменным. Таким образом, электромеханические характеристики при различных значениях магнитного потока  $\Phi_{ном} > \Phi_1 > \Phi_2$  будут иметь вид прямых 1...3, представленных на рис. 4.10, а.

Момент короткого замыкания  $M_{к.з} = k\Phi I_{к.з}$ , т.е. при уменьшении магнитного потока  $\Phi$  он будет также снижаться, так как  $I_{к.з} = \text{const}$ . Значит, механические характеристики двигателя будут иметь вид прямых, показанных на рис. 4.10, б.

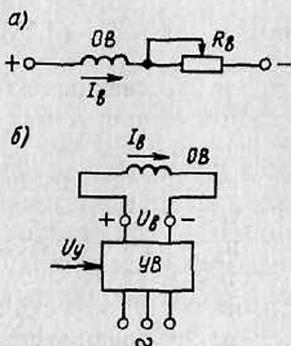


Рис. 4.9

Показатели данного способа регулирования скорости ДПТНВ следующие: диапазон регулирования 3...4; направление регулирования - вверх от естественной характеристики; плавность регулирования определяется плавностью регулирования тока возбуждения; стабильность скорости достаточно высокая, хотя она и снижается при уменьшении магнитного потока. Способ экономичен, так как регулирование скорости не сопровождается значительными потерями мощности, а реализация его не требует больших капитальных затрат.

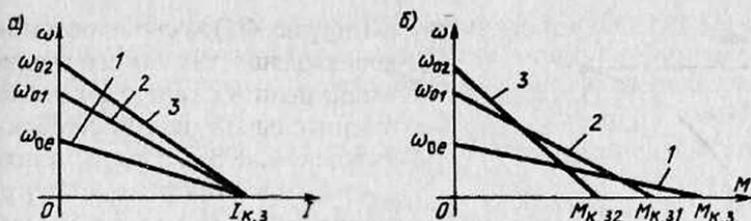


Рис. 4.10

Допустимую нагрузку ДПТ при его работе на искусственных характеристиках определим по (4.3), полагая  $I = I_{в.ном}$ :

$$M_{доп} = k \Phi_{и} I_{ном}, \quad (4.26)$$

где  $\Phi_{и}$  – магнитный поток на искусственной характеристике.

Так как при данном способе регулирования  $\Phi_{и} < \Phi_{ном}$ , то и  $M_{доп} < M_{ном}$ , т. е. двигатель по условиям нагрева не может быть нагружен на искусственных характеристиках номинальным моментом.

Для определения допустимой нагрузки двигателя сделаем дополнительный расчет. Запишем выражение для ЭДС якоря на естественной и искусственной характеристиках при номинальном токе:

$$E_c = k \Phi_{ном} \omega_{ном} = U_{ном} - I_{ном} R_r;$$

$$E_{и} = k \Phi_{и} \omega_{и} = U_{ном} - I_{ном} R_r.$$

Так как  $U_{ном} - I_{ном} R_r = \text{const}$ , то из равенства  $E_c = E_{и}$  вытекает следующее соотношение:

$$\Phi_{и} = \Phi_{ном} \omega_{ном} / \omega_{и}, \quad (4.27)$$

где  $\omega_{и}$  – скорость на искусственной характеристике при  $I = I_{ном}$ .

Подставляя (4.27) в (4.26), получаем

$$M_{доп} \omega_{и} = M_{ном} \omega_{ном} = P_{ном} = \text{const}. \quad (4.28)$$

Как видно из (4.28), при работе двигателя на искусственных характеристиках он может быть нагружен на свою номинальную мощность. Объясняется это тем, что хотя момент нагрузки при уменьшении магнитного потока снижается, но одновременно повышается скорость двигателя, а их произведение, определяющее механическую мощность, остается неизменным и равным номинальной мощности. Таким образом, регулирование скорости изменением магнитного потока целесообразно при постоянной механической мощности нагрузки, что обеспечивает полное его использование при работе на всех искусственных характеристиках.

**Задача 4.10\*.** Паспортные данные ДПТНВ приведены в задаче 4.3. Определить магнитный поток и ток возбуждения, при которых искусственная механическая характеристика пройдет через точку с координатами  $\omega_n = 250$  рад/с,  $M_n = 15$  Н·м.

Решая (4.5) с учетом того, что  $R = R_n$  и  $U = U_{ном}$ , получим

$$\omega_n (k\Phi_n)^2 - U_{ном} k\Phi_n + M_n R_n = 0.$$

Это уравнение имеет два решения:  $k\Phi_{n1} = 0,85$  В·с;  $k\Phi_{n2} = 0,027$  В·с. Целесообразно выбрать большее из двух полученных значений, так как в этом случае момент двигателя  $M_n$  обеспечивается при меньшем токе якоря.

Для определения тока возбуждения  $I_{вн}$  рассчитаем относительное значение найденного магнитного потока:  $(k\Phi_n)/(k\Phi_{ном}) = \Phi_n^* = 0,85/1,3 \approx 0,61$ , зная который, с помощью кривой намагничивания (см. рис. 4.8) определим относительный ток возбуждения  $I_{вн}^* = I_{вн}/I_{вн,ном} = 0,38$  А, т. е.  $I_{вн} = I_{вн,ном} I_{вн}^* = 0,8 \cdot 0,38 = 0,3$  А.

**Задача 4.11.** Для рассмотренного в задаче 4.3 ДПТНВ определить магнитный поток, ток возбуждения и сопротивление добавочного резистора в цепи обмотки возбуждения, при которых скорость идеального холостого хода на искусственной характеристике будет на 75% больше скорости холостого хода на естественной характеристике.

#### 4.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ ЯКОРЯ. СИСТЕМА «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ»

Данный способ широко используется для регулирования любых координат ЭП при высоких требованиях к показателям его качества. По этой причине до недавнего времени он являлся основным при создании регулируемых ЭП постоянного тока.

Реализация этого способа предусматривает питание якоря ДПТНВ от преобразователя, выходное напряжение которого регулируется по значению и может изменяться при необходимости по полярности. Поскольку основным источником питания ЭП служит сеть переменного тока, то таким преобразователем является управляемый выпрямитель (УВ).

Схема ЭП при питании якоря двигателя от УВ, получившая название система УВ – Д, показана на рис. 4.11, а. Здесь  $E_n$  – ЭДС УВ;  $R_n$  – внутреннее сопротивление УВ;  $k_n = E_n/U_y$  – коэффициент усиления УВ, где  $U_y$  – входной сигнал управления. Напряжение на выходе УВ вследствие наличия внутреннего сопротивления  $R_n$  определяется по формуле

$$U = E_n - IR_n. \quad (4.29)$$

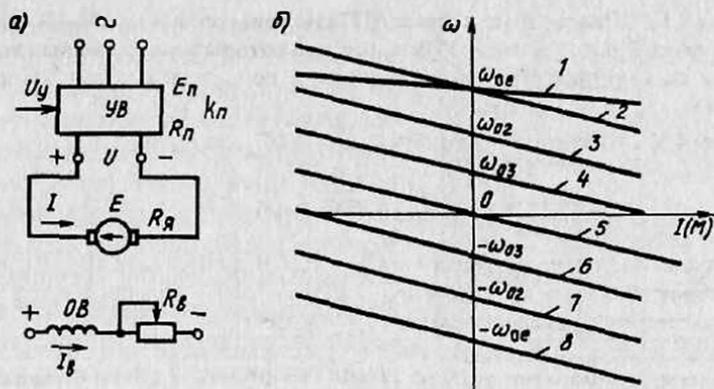


Рис. 4.11

Обмотка возбуждения ДПТНВ питается от отдельного источника постоянного тока, например от неуправляемого или тоже управляемого выпрямителя.

Формулы для определения электромеханической и механической характеристик получим, подставляя (4.29) в (4.4) и (4.5):

$$\omega = E_n / (k\Phi) - I(R_я + R_n) / (k\Phi) = \omega_0 - \Delta\omega; \quad (4.30)$$

$$\omega = E_n / (k\Phi) - M(R_я + R_n) / (k\Phi)^2 = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (4.31)$$

Из (4.30) и (4.31) видно, что при изменении  $E_n$  пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода  $\omega_0$ , а искусственные характеристики 2... 8 (см. рис. 4.11, б), оставаясь линейными и параллельными друг другу, имеют по сравнению с естественной характеристикой  $I$  ДПТНВ больший наклон из-за наличия сопротивления  $R_n$  в выражении для определения перепада скорости  $\Delta\omega$  (отметим, что естественная характеристика  $I$  соответствует питанию двигателя от источника с нулевым внутренним сопротивлением). Характеристики располагаются во всех четырех квадрантах параллельно друг другу; при  $E_n = 0$  ДПТ работает в режиме динамического торможения.

Характеристики 2... 8 соответствуют следующим соотношениям ЭДС УВ:  $E_{n2} > E_{n3} > E_{n4}$ ;  $E_{n5} = 0$ ;  $E_{n6} = -E_{n4}$ ;  $E_{n7} = -E_{n3}$ ;  $E_{n8} = -E_{n2}$ .

Управляемый выпрямитель чаще всего выполняется в виде электромашинной системы «генератор – двигатель» (Г – Д) или системы «тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП – Д).

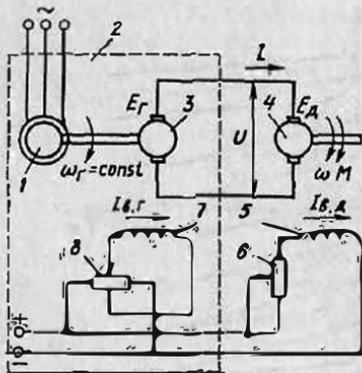


Рис. 4.12

**Система «генератор – двигатель».** В этой системе, схема которой показана на рис. 4.12, якорь 4 двигателя непосредственно присоединяется к якорю 3 генератора, образующего вместе с приводным двигателем 1 электромашинный выпрямитель 2 трехфазного переменного тока в постоянный, вращающийся со скоростью  $\omega_r$ . Регулирование напряжения на якоре двигателя происходит за счет изменения тока возбуждения генератора  $I_{f.g}$  с помощью потенциометра 8, при этом изменяется ЭДС генератора  $E_g$  и соответственно напря-

жение на якоре двигателя  $U$ . Регулирование напряжения в этой системе может сочетаться с воздействием на магнитный поток двигателя, что обеспечит двухзонное регулирование скорости.

Регулирование магнитного потока двигателя осуществляется изменением  $I_{f.d}$  за счет включения в цепь обмотки 5 возбуждения двигателя резистора 6. В замкнутых ЭП питание обмотки 7 возбуждения генератора происходит от регулируемого источника постоянного тока, например полупроводникового УВ. Характеристики системы Г – Д соответствуют приведенным на рис. 4.11, б.

Основными достоинствами системы Г – Д являются большой диапазон и плавность регулирования скорости двигателя, высокая жесткость и линейность характеристик, возможность получения всех энергетических режимов работы, в том числе и рекуперативного торможения. В то же время для нее характерны такие недостатки, как утроенная установленная мощность системы, низкий КПД, инерционность процесса регулирования скорости, шум при работе.

**Система «тиристорный преобразователь – двигатель».** Основным типом преобразователей, применяемых в настоящее время в регулируемых ЭП постоянного тока, являются полупроводниковые статические преобразователи и, в первую очередь, тиристорные. Они представляют собой управляемые реверсивные или нереверсивные выпрямители, собранные по нулевой или мостовой однофазной или трехфазной схемам. Определенные перспективы связаны с использованием в них силовых транзисторов, которые в настоящее время применяются в основном для импульсного регулирования напряжения в ЭП небольшой мощности.

Принцип действия, свойства и характеристики системы ТП – Д рассмотрим на примере схемы, приведенной на рис. 4.13, а, в которой использован однофазный двухполупериодный нереверсивный тиристорный выпрямитель, собранный по нулевой схеме.

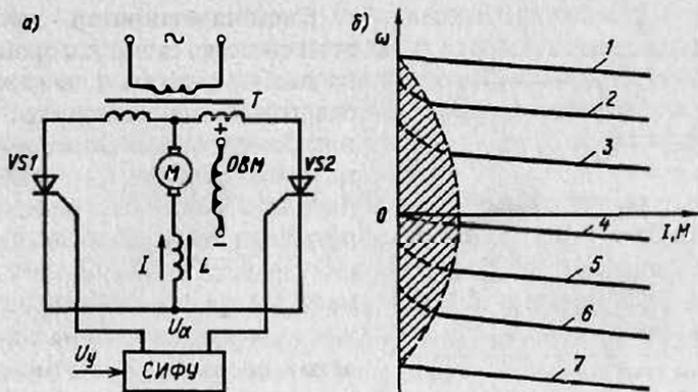


Рис. 4.13

Управляемый выпрямитель (преобразователь) включает в себя согласующий трансформатор  $T$ , имеющий две вторичные обмотки, два тиристора  $VS1$  и  $VS2$ , сглаживающий реактор с индуктивностью  $L$  и систему импульсно-фазового управления СИФУ. Обмотка возбуждения двигателя  $ОБМ$  питается от своего источника.

Выпрямитель обеспечивает регулирование напряжения на двигателе за счет изменения среднего значения своей ЭДС  $E_d$ . Это достигается с помощью СИФУ, которая по сигналу  $U_y$  изменяет угол управления тиристорами  $\alpha$  (угол задержки открытия тиристоров  $VS1$  и  $VS2$  относительно момента, когда потенциал на их анодах становится положительным по сравнению с потенциалом на катоде). Когда  $\alpha = 0$ , т. е. тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  получают импульсы управления  $U_\alpha$  от СИФУ в указанный момент, преобразователь осуществляет двухполупериодное выпрямление и на якорь двигателя подается полное напряжение. Если с помощью СИФУ подача импульсов управления на тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  происходит со сдвигом (задержкой) на угол  $\alpha \neq 0$ , то ЭДС преобразователя снижается, а следовательно, уменьшается среднее напряжение, подводимое к двигателю.

Зависимость среднего значения ЭДС многофазного преобразователя от угла управления тиристорами  $\alpha$  имеет вид

$$E_{cp} = E_{max} m \sin(\pi/m) \cos(\alpha/\pi) = E_{cp0} \cos \alpha, \quad (4.32)$$

где  $m$  – число фаз;  $E_{max}$  – амплитудное значение ЭДС преобразователя;  $E_{cp0}$  – ЭДС преобразователя при  $\alpha = 0$ .

Ввиду пульсирующего характера ЭДС преобразователя ток в цепи якоря также является пульсирующим, что оказывает вредное влияние на работу двигателя, приводя к ухудшению условий работы его коллектора, дополнительным потерям энергии и нагреву. Для уменьшения вредного влияния пульсации тока в цепь якоря обыч-

но включается сглаживающий реактор, индуктивность  $L$  которого выбирается в зависимости от допустимого уровня пульсации тока.

Уравнения для электромеханической и механической характеристик двигателя (см. рис. 4.13, б), питаемого от тиристорного преобразователя, получим, заменив в (4.30) и (4.31)  $E_n$  на  $E_{cp}$  из (4.32):

$$\omega = E_{cp0} \cos \alpha / (k\Phi) - I(R_{\Sigma} + R_n) / (k\Phi); \quad (4.33)$$

$$\omega = E_{cp0} \cos \alpha / (k\Phi) - M(R_{\Sigma} + R_n) / (k\Phi)^2, \quad (4.34)$$

где  $R_n = x_{\tau} m / (2\pi) + R_{\tau} + R_L$  — эквивалентное сопротивление преобразователя;  $x_{\tau}$ ,  $R_{\tau}$  — соответственно приведенные ко вторичной обмотке индуктивное сопротивление рассеяния и активное сопротивление обмоток трансформатора;  $R_L$  — активное сопротивление сглаживающего реактора.

Особенностью характеристик двигателя при его питании от УВ является наличие области (заштрихована на рисунке 4.13, б), где его характеристики нелинейны. В этой области двигатель работает в режиме прерывистого тока, что определяет заметное изменение (уменьшение) жесткости характеристик. Вследствие односторонней проводимости преобразователя характеристики располагаются только в первом (1...3 при  $\alpha = 0; 30, 60^\circ$ ) и четвертом (4...7 при  $\alpha = 90, 120, 150, 180^\circ$ ) квадрантах. Меньшим углам управления соответствует большая  $E_n$  и, следовательно, более высокая скорость двигателя; при  $\alpha = \pi/2$  ЭДС УВ  $E_n = 0$  и двигатель работает в режиме динамического торможения.

На рис. 4.14 приведена схема ЭП с трехфазным мостовым нереверсивным УВ. Характеристики двигателя при использовании это-

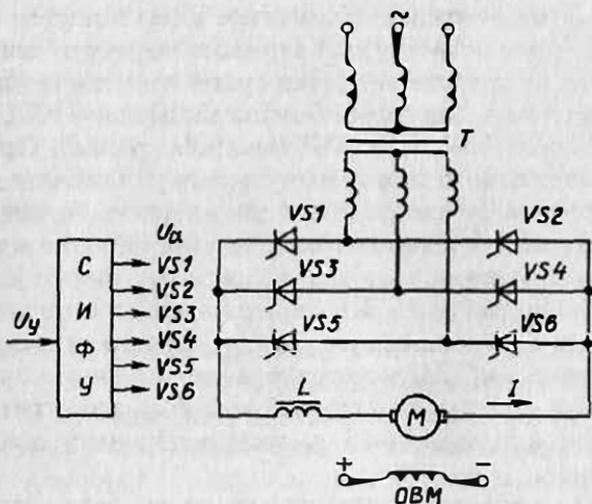


Рис. 4.14

го типа выпрямителя аналогичны показанным на рис. 4.13, б. Вместе с тем пульсации тока в якоре двигателя при использовании такой схемы меньше, чем при использовании схемы, приведенной на рис. 4.13, а. В некоторых случаях можно также не использовать согласующий трансформатор Т.

Для получения характеристик двигателя во всех четырех квадрантах используются реверсивные управляемые выпрямители, которые состоят из двух нереверсивных выпрямителей, например с нулевым выводом (рис. 4.15, а). Получить характеристики ДПТ в четырех квадрантах можно также и при использовании нереверсивного преобразователя за счет изменения направления тока возбуждения двигателя.

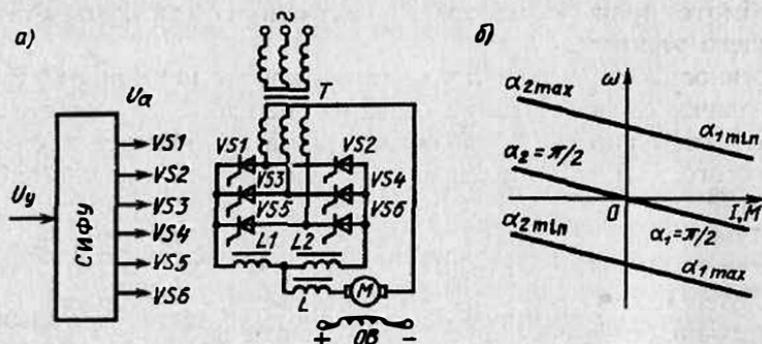


Рис. 4.15

В реверсивных УВ используются два основных принципа управления комплектами вентилей: совместное и раздельное.

*Совместное управление* предусматривает подачу от системы импульсно-фазового управления тиристорами импульсов управления  $U_\alpha$  одновременно на тиристоры обоих комплектов —  $VS1, VS3, VS5$  (катодная группа) и  $VS2, VS4, VS6$  (анодная группа). При этом за счет наличия угла сдвига между импульсами управления двух комплектов тиристоров, близкого к  $\pi$ , один из них работает в выпрямительном режиме и проводит ток, а другой, работая в инверторном режиме, ток не проводит. Для обеспечения такого управления между средними значениями ЭДС выпрямителя и инвертора должно существовать соотношение  $E_{cp.и} \geq E_{cp.в}$ , однако за счет разности мгновенных значений ЭДС между комплектами тиристоров протекает так называемый уравнивающий ток. Для его ограничения в схеме, приведенной на рис. 4.15, а, предусмотрены уравнивательные реакторы  $L_1$  и  $L_2$ .

Вид характеристик двигателя зависит от способа согласования углов управления двумя комплектами тиристоров. При линейном со-

гласовании сумма углов выпрямителя  $\alpha_1$  и инвертора  $\alpha_2$  поддерживается равной  $\pi$ , характеристики двигателя линейны (см. рис. 4.15, б) и аналогичны характеристикам системы Г – Д.

Для уменьшения уравнительных токов в ряде случаев используется нелинейное согласование, при котором сумма углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  несколько отличается от  $\pi$ . В этом случае имеет место заметное увеличение скорости двигателя при переходе от двигательного режима к генераторному. В силу этого обстоятельства нелинейное согласование применяется относительно редко.

*Раздельное управление* используется для полного исключения уравнительных токов между комплектами тиристоров реверсивного УВ. Сущность его состоит в том, что импульсы управления подаются только на один из комплектов, который должен в данный момент проводить ток. На второй комплект импульсы не подаются, и он не работает (закрыт).

Управление преобразователем осуществляется в этом случае с помощью специального логического переключающего устройства (ЛПУ). Это устройство, осуществляя контроль за током преобразователя, обеспечивает включение в работу и выключение комплектов тиристоров с небольшой паузой в 5...10 мс. Вследствие этого вблизи оси скорости имеет место режим прерывистых токов, что отражается в нелинейности характеристик двигателя.

В заключение остановимся на основных свойствах системы ТП – Д. К достоинствам рассматриваемой системы относятся плавность и значительный диапазон регулирования скорости (более 10 в замкнутых ЭП); большая жесткость получаемых искусственных характеристик; высокий КПД электропривода, определяемый высокими КПД трансформаторов (0,93...0,98) и УВ (0,9...0,92); бесшумность в работе; простота в обслуживании и эксплуатации.

Наряду со значительными достоинствами системе ТП – Д присущи следующие недостатки: преобразователь имеет одностороннюю проводимость; для получения характеристик во всех четырех квадрантах необходимо использовать реверсивный двухкомплектный преобразователь; напряжение на якоре и ток имеют пульсирующий характер, что ухудшает условия работы двигателя; для сглаживания пульсации тока в большинстве случаев применяют сглаживающий реактор или более сложные многофазные схемы выпрямления; работа УВ характеризуется режимом прерывистого тока, при котором резко падает жесткость характеристик и они становятся нелинейными; с ростом диапазона регулирования скорости снижается коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) ЭП, определяемый для системы ТП – Д по приближенной формуле  $\cos \varphi \approx \cos \alpha$ ; при работе электропривода вносятся искажения в форму тока и напряжения источника питания, что отрицательно сказывается на работе дру-

гих приемников электроэнергии; тиристорные преобразователи обладают невысокой помехозащищенностью и малой перегрузочной способностью по току и напряжению.

Несмотря на отмеченные недостатки, система ТП – Д является высокоэффективным регулируемым ЭП постоянного тока и широко применяется для привода таких ответственных рабочих машин, как прокатные станы, металлорежущие станки, экскаваторы и др.

**Задача 4.12.** ДПТНВ типа 2ПФ250 имеет следующие паспортные данные:  $U_{ном} = 220$  В;  $P_{ном} = 45$  кВт;  $n_{ном} = 1000$  об/мин;  $I_{ном} = 233$  А;  $R_a = 0,07$  Ом. Рассчитать и построить электрохимическую и механическую характеристики двигателя при питании его от ТП с внутренним сопротивлением  $R_n = 0,1$  Ом при  $E_n = U_{ном}$ . Определить значение  $E_n$ , при котором механическая характеристика пройдет через точку с координатами  $\omega_n = 30$  рад/с,  $M_n = 400$  Н·м, и построить эту характеристику. Определить для рассчитанной  $E_n$  угол управления тиристорами  $\alpha$ , приняв  $E_{ср0} = 220$  В.

#### 4.8. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЕ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ»

Наличие такого эффективного средства управления двигателем, как силовой преобразователь (выпрямитель), позволяет формировать требуемые графики скорости, ускорения, положения, тока и момента в переходных процессах.

**Переходные процессы в системе «генератор – двигатель».** Особенностью переходных процессов в этой системе является значительная инерционность электромашинного преобразователя – генератора постоянного тока, которая обусловлена большой индуктивностью его обмотки возбуждения, с помощью которой и осуществляется управление двигателем.

Управление двигателем в системе Г – Д, упрощенная схема которой приведена на рис. 4.16, осуществляется за счет регулирования тока возбуждения генератора  $I_{г.в}$ . В частности, пуск двигателя происходит после замыкания одной из пар контактов В (условное направление его вращения вперед) или Н (назад), реверс – после переключения этих контактов, а торможение – после отключения

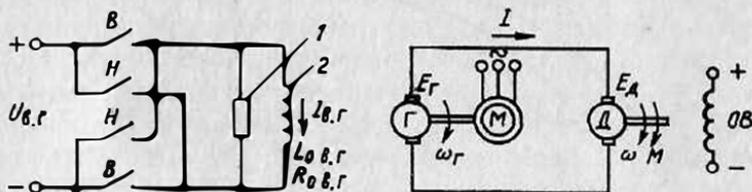


Рис. 4.16

обмотки возбуждения 2 генератора от источника напряжения и при замыкании ее на разрядный резистор  $l$ . В результате процессы в цепи обмотки возбуждения  $OB$  генератора являются определяющими для ЭП, а процессы изменения остальных его координат – тока, момента, скорости – зависящими от параметров цепи якоря и механической части ЭП и от процессов в цепи возбуждения генератора.

Рассмотрим качественно (без вывода формул и подробного анализа) переходные процессы пуска, реверса и торможения двигателя в системе Г – Д при  $M_c = 0$  (при холостом ходе). Переходный процесс в системе характеризуется изменением во времени ЭДС генератора  $e_r(t)$ , ЭДС двигателя  $e_d(t)$ , которая, согласно формуле  $E = k\Phi\omega$ , в другом масштабе иллюстрирует график изменения скорости  $\omega(t)$  и тока якоря  $i(t)$ , пропорционального моменту двигателя  $M(t)$ .

Для анализа переходных процессов используем два основных соотношения между переменными ЭП, первое из которых следует из схемы, приведенной на рис. 4.16, а второе – из уравнений (2.16) и (4.3) при  $M_c = 0$ :

$$i = (e_r - e_d) / R_{\text{я}}; \quad (4.35)$$

$$d\omega/dt = M/J = k\Phi i/J. \quad (4.36)$$

На рис. 4.17 показаны графики переходных процессов в системе Г – Д при пуске (а), реверсе (б) и торможении (в).

Пуск двигателя начинается (см. рис. 4.16) после замыкания контактов В (или Н) и сопровождается нарастанием тока возбуждения

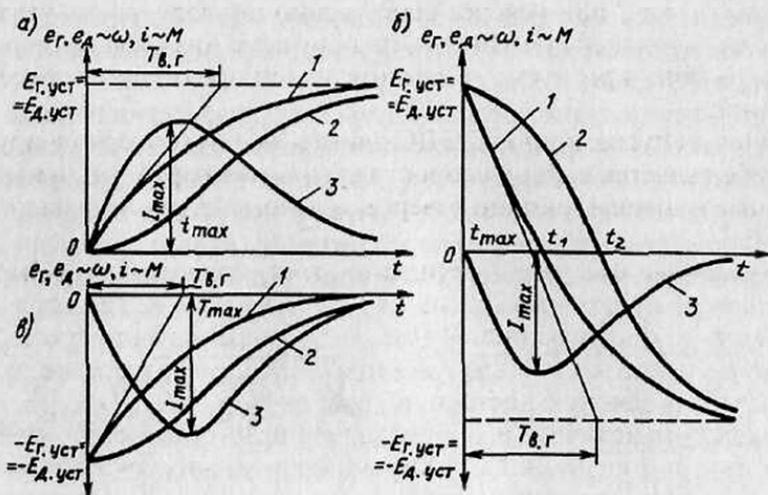


Рис. 4.17

и ЭДС генератора по экспоненциальному закону (см. рис. 4.17, а). С учетом того, что в начале пуска  $E_{г.нач} = 0$ , экспоненциальная зависимость  $I$  ЭДС генератора  $e_g(t)$  характеризуется постоянной времени  $T_{в.г} = L_{о.в.г} / R_{о.в.г}$ .

Кривую 3 тока  $i(t)$  строим с учетом того, что момент нагрузки  $M_c$  на валу двигателя отсутствует, вследствие чего начальное и конечное значения тока равны нулю, т.е., другими словами, кривая тока начинается из начала координат и имеет своей асимптотой ось времени.

В промежутке между нулевыми начальным и конечным своими значениями ток в якоре при пуске двигателя достигает максимального значения  $I_{max}$  в момент времени  $t_{max}$ .

Кривую 2 ЭДС двигателя  $e_d(t)$  (см. рис. 4.17, а) строим с учетом полученной зависимости  $i(t)$ , которая в соответствии с (4.36) пропорциональна производной скорости  $d\omega/dt$ , т.е. она имеет горизонтальные касательные на начальном и конечном интервалах переходного процесса, а в момент времени  $t_{max}$ , когда ток максимален, — перегиб. Учитывая также, что при  $M_c = 0$  в соответствии с (4.35)  $E_{д.уст} = E_{г.уст}$ , а  $E_{д.нач} = 0$ , получаем кривую 2. Отметим, что в момент времени  $t_{max}$ , когда  $i = I_{max}$ , согласно (4.35) разность ЭДС генератора и двигателя максимальна.

*Реверс двигателя* осуществляется изменением полярности напряжения возбуждения  $U_{в.г}$  (см. рис. 4.16), для чего размыкаются контакты  $B$  и замыкаются контакты  $H$ . Вследствие этого начинает изменяться по экспоненциальному закону с постоянной времени  $T_{в.г}$  ЭДС генератора от начального значения  $E_{г.уст}$  до конечного значения —  $E_{г.уст}$  (кривая 1 на рис. 4.17, б).

Кривая тока 3 при реверсе качественно повторяет кривую тока при пуске, но максимум тока в этом случае в два раза превышает максимум тока при пуске, а сам ток имеет противоположное направление.

Как и при пуске, кривая 2 ЭДС двигателя  $e_d(t)$  (которая в другом масштабе является кривой скорости  $\omega(t)$ ) имеет горизонтальные касательные в начале и конце реверса, а в момент максимума тока — перегиб.

*Торможение двигателя* осуществляется отключением обмотки возбуждения от источника питания и замыканием ее на разрядный резистор  $l$  с сопротивлением  $R_p$  (см. рис. 4.16). В результате этого начинают уменьшаться ток возбуждения и ЭДС генератора по экспоненциальному закону с постоянной времени  $T_{в.г} = L_{о.в.г} / (R_{о.в.г} + R_p)$ .

Процесс уменьшения ЭДС генератора при торможении иллюстрирует кривая 1 на рис. 4.17, в. Характер изменения тока в этом случае аналогичен характеру изменения тока в режимах пуска и реверса: начальное и конечное значения тока равны нулю, а в момент  $t_{max}$  имеет место максимум тока  $I_{max}$ .

Аналогичный пуску и реверсу характер имеет кривая 2 ЭДС двигателя (и повторяющая ее форму кривая скорости). Переходные процессы в системе Г – Д при  $M_c \neq 0$ , а также их математическое описание рассмотрены в [14, 19].

Особенностью переходных процессов в системе Г – Д является их значительное время. Так, если электромагнитная постоянная времени обмоток якоря двигателя и генератора обычно составляет сотые доли секунды, то для их обмоток возбуждения при мощности двигателя до 15 кВт она равна 0,1 ... 0,6 с, до 75 кВт – 0,8 ... 0,9 с, а до 3000 кВт составляет 2 ... 4 с. Это обстоятельство приводит к тому, что переходные процессы в системе Г – Д, если не предпринимать специальных мер, оказываются очень затянутыми. Такое положение является нежелательным, особенно для рабочих машин, в которых переходные процессы составляют основную часть технологического цикла. Например, реверсивные прокатные станы металлургической промышленности по условиям технологии должны производить 15 ... 20 реверсов в минуту, т.е. замедленные переходные процессы приведут к существенному снижению их производительности. Для устранения этого недостатка в системе Г – Д осуществляют форсирование (ускорение) переходных процессов. В общем случае оно обеспечивается с помощью обратных связей в замкнутых системах или так называемыми параметрическими способами в разомкнутых и предусматривает в обоих случаях ускорение процесса возбуждения генератора.

Способы форсирования переходных процессов в системе Г – Д рассматриваются в [14, 19].

**Переходные процессы в системе «тиристорный преобразователь – двигатель».** В отличие от электромашинного полупроводниковый тиристорный преобразователь (ТП) имеет малую инерционность. Так, в практических расчетах постоянная времени ТП (СИФУ и силовой части) принимается равной нескольким сотым долям секунды, что позволяет эффективно формировать желаемый характер переходных процессов в этой системе.

Один из простых способов получения желаемых динамических характеристик предусматривает использование специального устройства, называемого задатчиком интенсивности. Задатчик интенсивности используется как в замкнутом, так и разомкнутом ЭП, выполненном по системе ТП – Д (рис. 4.18, а).

Получение требуемых графиков изменения координат ЭП в переходных процессах, как и общее управление двигателем, осуществляется в системах ТП – Д за счет соответствующего регулирования ЭДС преобразователя  $E_{г,п}$  и тем самым напряжения  $U$ , подводимого к якорю двигателя. Допустим, что скорость двигателя в системе ТП – Д должна изменяться по графику, показанному на

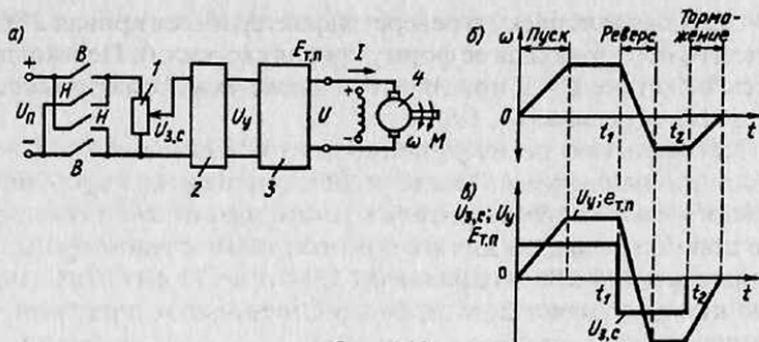


Рис. 4.18

рис. 4.18, б, и при этом ток и момент не должны превосходить допустимый уровень. В соответствии с этим графиком в момент времени  $t = 0$  осуществляется пуск двигателя (закрываются контакты  $B$  на рис. 4.18, а), в момент времени  $t_1$  – реверс (размыкаются контакты  $B$  и замыкаются контакты  $H$ ), а в момент  $t_2$  – торможение (размыкаются контакты  $H$ ). Для реализации такого графика скорости в момент времени  $t = 0$  на вход ЭП скачкообразно подается задающий сигнал по скорости  $U_{3c}$ , в момент времени  $t_1$  он скачкообразно изменяется и становится равным  $-U_{3c}$ , а в момент времени  $t_2$  этот сигнал снимается.

Если не предпринять специальных мер по формированию графика скорости, то переходные процессы в ЭП будут существенно отличаться от заданных, а из-за малой инерционности преобразователя будут иметь место недопустимо большие броски тока и момента.

Для получения требуемых графиков переменных ЭП в переходных процессах между источником задающего сигнала потенциометром 1 и тиристорным преобразователем 3 помещают задатчик интенсивности 2. При подаче на вход задатчика ступенчатого сигнала  $U_{3c}$  сигнал на его выходе начинает изменяться во времени плавно (например, по линейному или экспоненциальному закону) и достигает уровня входного сигнала за определенный интервал времени. Аналогичное постепенное изменение сигнала на выходе задатчика интенсивности 2 и тем самым на входе тиристорного преобразователя 3 имеет место и при смене полярности сигнала задания скорости  $U_{3c}$  или его снятии. Интервал развертки во времени входного сигнала, т. е. интенсивность его изменения, в задатчике интенсивности регулируется и может быть установлен в широких пределах – от долей секунды до нескольких десятков секунд.

На графике рис. 4.18, б показано требуемое изменение во времени сигнала управления  $U_{У}(t)$ , которое вызывает в силу малой инерционности тиристорного преобразователя практически такое же изменение его ЭДС  $e_{T,п}$ . За счет плавного изменения ЭДС и напря-

жения  $U$  на двигателе 4 график скорости будет близок к заданному (см. на рис. 4.18, б), а ток и момент в переходных процессах ЭП за счет соответствующего изменения напряжения  $U$  не превысят своих допустимых значений.

Рассмотрим теперь более подробно графики скорости, тока и момента при формировании переходных процессов с помощью датчика интенсивности для самого простого случая, когда  $M_c = 0$  (двигатель без нагрузки), а электромагнитная инерция тиристорного преобразователя и цепи якоря двигателя не учитывается.

В этом случае изменение скорости описывается дифференциальным уравнением

$$T d\omega/dt + \omega = \omega_{уст}, \quad (4.37)$$

которое отличается от уравнения (2.29) только тем, что в его правой части установившаяся скорость является некоторой функцией времени, а не константой, вследствие того, что напряжение на двигателе из-за наличия датчика интенсивности изменяется не скачкообразно, а плавно в заданной функции времени. Применительно к случаю  $M_c = 0$

$$\omega_{уст}(t) = \omega_0(t) = e_{т.п}(t)/(k\Phi) \sim e_{т.п}(t), \quad (4.38)$$

т.е. закон изменения скорости холостого хода  $\omega_0(t)$  определяется изменением ЭДС преобразователя  $e_{т.п}(t)$ , которая, в свою очередь, определяется графиком  $U_y(t)$  (см. рис. 4.18, в).

Получим теперь математическое выражение изменения скорости  $\omega(t)$ , считая, что сигнал управления  $U_y$  и, следовательно, ЭДС преобразователя изменяются по линейному временному закону, а  $M_c = 0$ :

$$e_{т.п} = E_{т.п.нач} + k_c t, \quad (4.39)$$

где  $E_{т.п.нач}$  – начальное значение ЭДС преобразователя;  $k_c$  – коэффициент, характеризующий скорость изменения ЭДС во времени, В/с.

С учетом (4.38) и (4.39) исходное дифференциальное уравнение скорости (4.37) примет вид

$$T_m d\omega/dt + \omega = \varepsilon t + \omega_0, \quad (4.40)$$

где  $\omega_0 = E_{т.п.нач}/(k\Phi)$ .

Для получения зависимости  $\omega(t)$  необходимо найти сумму частного решения уравнения (4.40) и общего решения уравнения (2.31). Частное решение (4.40) в соответствии с видом его правой части имеет вид

$$\omega_{пр} = \varepsilon t + A. \quad (4.41)$$

Подставив  $\omega_{пр}$  в (4.40), найдем

$$A = \omega_{0нач} - T_m \varepsilon. \quad (4.42)$$

Решение уравнения (4.40) с учетом того, что  $\omega_{св} = C e^{-t/T_m}$ , будет иметь вид

$$\omega = \varepsilon t + \omega_{0нач} - T_m \varepsilon + C e^{-t/T_m}, \quad (4.43)$$

где последний член правой части представляет собой свободную составляющую переходного процесса.

Для нахождения постоянной  $C$  используем начальные условия: при  $t = 0$   $\omega = \omega_{нач}$ , следовательно

$$C = \omega_{нач} - \omega_{0нач} + T_m \varepsilon. \quad (4.44)$$

Окончательно решение уравнения (4.40) с учетом (4.44) будет иметь вид

$$\omega = (\varepsilon t + \omega_{0нач} - T_m \varepsilon) (1 - e^{-t/T_m}) + \omega_{0нач} e^{-t/T_m}. \quad (4.45)$$

Изменение момента двигателя во времени найдем, используя (2.16) при  $M_c = 0$ :

$$M = J\varepsilon + J(\omega_{0нач} - \omega_{нач} - T_m \varepsilon) / T_m e^{-t/T_m}. \quad (4.46)$$

Разделив обе части (4.46) на  $k\Phi$ , получим выражение для изменения тока двигателя во времени:

$$i = (T_m \varepsilon + (\omega_{0нач} - T_m \varepsilon)) e^{-t/T_m} / \omega_{0уст}. \quad (4.47)$$

Выражения (4.45)...(4.47) описывают переходные процессы в системе ТП – Д без учета электромагнитной инерции преобразователя и цепи якоря двигателя при линейном изменении во времени ЭДС преобразователя и  $M_c = 0$ . Отметим, что изменение угла поворота вала двигателя во времени  $\varphi(t)$  можно найти путем интегрирования уравнения  $d\varphi = \omega dt$  после подстановки в него выражения (4.45). С помощью (4.45) и (4.46) рассмотрим конкретные виды переходных процессов.

При пуске графики изменения во времени сигнала управления  $U_y(t)$ , ЭДС преобразователя  $e_{т.п}(t)$  и скорости холостого хода двигателя  $\omega_0(t)$  состоят из двух участков. На первом участке эти величины изменяются по линейному закону от нуля до установившегося (номинального) значения, а на втором участке остаются неизменными. Скорость холостого хода

$$\left. \begin{aligned} \omega_0(t) &= \varepsilon_n t && \text{при } 0 < t < t_{п0}; \\ \omega_0 &= \omega_{0уст} && \text{при } t \geq t_{п0}, \end{aligned} \right\} \quad (4.48)$$

где  $\omega_{0уст}$  – скорость холостого хода на верхней характеристике;  $t_{п0}$  – время нарастания сигнала управления  $U_y$  с производной  $\varepsilon_n$  при пуске вхолостую.

На рис. 4.19, а показаны кривые переходного процесса при пуске ДПТ вхолостую в системе ТП – Д с использованием задатчика интенсивности. Зависимость  $\omega_0(t)$  имеет вид ломаной линии 1.

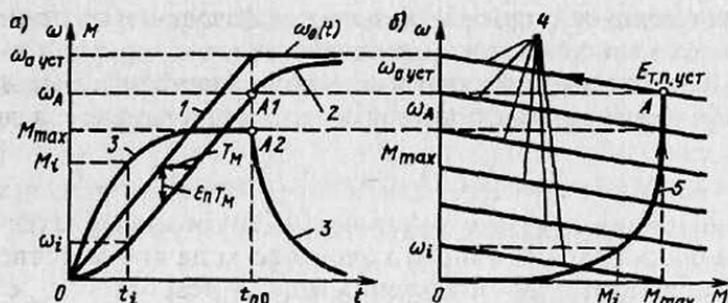


Рис. 4.19

При пуске с нулевыми начальными условиями и  $M_c = 0$  ( $\omega_{0\text{нач}} = \omega_{\text{нач}} = 0$ ) выражения (4.45) и (4.46) для первого интервала переходного процесса  $0 < t \leq t_{n0}$  будут иметь вид

$$\omega = \varepsilon_n t - T_m \varepsilon_n (1 - e^{-t/T_m}); \quad (4.49)$$

$$M = J \varepsilon_n (1 - e^{-t/T_m}). \quad (4.50)$$

Зависимости  $\omega(t)$  и  $M(t)$ , соответствующие (4.49) и (4.50), изображены на рис. 4.19, а соответственно кривыми 2 и 3.

Так как при  $t > 3T_m$   $e^{-t/T_m} \approx 0$ , выражения (4.49) и (4.50) можно преобразовать к виду

$$\omega = \varepsilon_n t - T_m \varepsilon_n; \quad (4.51)$$

$$M = J \varepsilon_n = M_{\text{max}}, \quad (4.52)$$

т. е. при  $t > 3T_m$  скорость двигателя изменяется по линейному временному закону (кривая 2), а его момент остается постоянным (кривая 3).

Из (4.51) и (4.52) следует также, что при  $t < t_{n0}$  скорость двигателя меньше скорости холостого хода на величину  $\omega_0 - \omega = T_m \varepsilon_n$ , а ее отставание по времени численно равно механической постоянной времени  $T_m$ . Отметим, что кривая 3 момента  $M(t)$  в другом масштабе является графиком тока  $i(t)$ .

На втором этапе переходного процесса при  $t > t_{n0}$  ЭДС преобразователя  $e_{\text{т.п}} = E_{\text{т.п.уст}} = \text{const}$ ;  $\omega_0(t) = \text{const}$  и зависимости скорости и момента соответствуют выражениям (2.30) и (2.32).

На рис. 4.19, б кривая переходного процесса при пуске двигателя 5 построена на плоскости его механических характеристик 4. Для

этого по кривым  $\omega(t)$  и  $M(t)$ , приведенным на рис. 4.19, а, для одного и того же момента времени  $t_i$  определяются значения  $\omega_i$  и  $M_i$ , и точка с этими координатами наносится на плоскость механических характеристик. Совокупность этих точек для разных моментов  $t_i$  и образует кривую 5, которая называется фазовой траекторией движения. Эта кривая также имеет два участка, соответствующие рис. 4.19, а, при этом второй участок начинается в точке А, когда ЭДС преобразователя достигает своего установившегося значения  $E_{т.п.уст}$ .

Торможение и реверс двигателя осуществляются за счет уменьшения по линейному закону ЭДС преобразователя и тем самым скорости идеального холостого хода соответственно на интервалах времени торможения  $0 \dots t_{т0}$  и реверса  $0 \dots t_{р0}$  с производной  $\epsilon_r$ :

$$\omega_0(t) = \omega_{0уст} - \epsilon_r t = \omega_{0уст} - \epsilon_r t, \quad (4.53)$$

что соответствует линиям 1 на графиках переходного процесса в системе ТП – Д при холостом ходе с использованием задатчика интенсивности в режимах торможения (рис. 4.20, а) и реверса (рис. 4.20, б). Конечное значение  $\omega_0$  при торможении равно нулю, а при реверсе  $\omega_0$ уст.

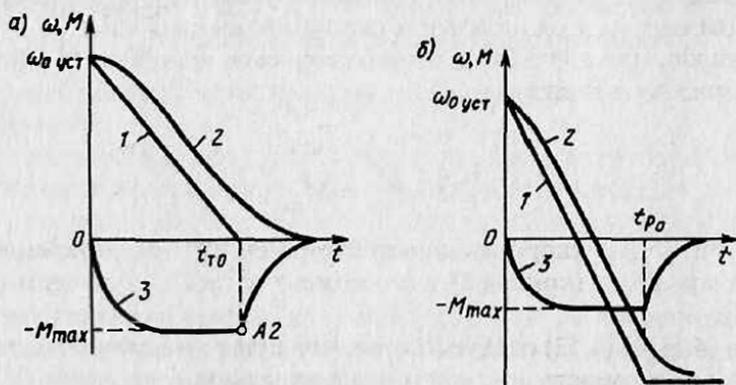


Рис. 4.20

Кривые 2 и 3 соответственно скорости  $\omega(t)$  и момента  $M(t)$  строятся по (4.45) и (4.46) с учетом (4.53). Характер и основные закономерности их изменения такие же, как в процессе пуска.

Переходные процессы в системе ТП – Д при наличии момента нагрузки  $M_c$  и использовании задатчика интенсивности подробно рассмотрены в [19].

#### 4.9. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В СХЕМЕ С ШУНТИРОВАНИЕМ ЯКОРЯ

Для ЭП ряда подъемно-транспортных машин и механизмов с целью получения пониженных (посадочных) скоростей движения их исполнительных органов применяется так называемая схема с шунтированием якоря ДПТНВ (рис. 4.21). В этой схеме параллельно якорю двигателя включен шунтирующий резистор  $R_{ш}$ , а последовательно – резистор  $R_{п}$ .

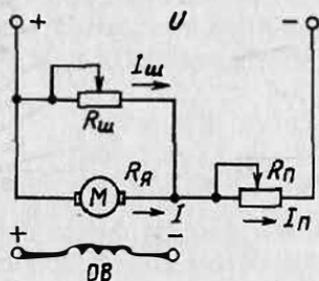


Рис. 4.21

Уравнения характеристик двигателя для такой схемы можно получить на основании выражений (4.2) и (4.3) и следующих соотношений, вытекающих из анализа самой схемы:

$$U = E + IR_{я} + I_{п}R_{п}; \quad (4.54)$$

$$U = I_{ш}R_{ш} + I_{п}R_{п}; \quad (4.55)$$

$$I_{п} = I + I_{ш}. \quad (4.56)$$

Подставляя в (4.54) и (4.55) ток  $I_{п}$  из (4.56), а затем исключая из полученных двух уравнений  $I_{ш}$ , получим выражения соответственно для электромеханической и механической характеристик:

$$\omega = a\omega_0 - I(R_{я} + aR_{п})/c; \quad (4.57)$$

$$\omega = a\omega_0 - M(R_{я} + aR_{п})/c^2, \quad (4.58)$$

где  $a = R_{ш}/(R_{ш} + R_{п})$ ;  $c = k\Phi$ .

Из (4.57) и (4.58) видно, что в схеме с шунтированием якоря снижается скорость идеального холостого хода и падает жесткость ха-

рактических по сравнению с основной схемой включения двигателя, что и показывают искусственные характеристики ДПТНВ. На рис. 4.22 показаны характеристики 1...3 при условии  $R_{щ} = \text{const}$ ,  $R_{п} = \text{var}$  (от 0 до  $\infty$ ), а на рис. 4.23 2...4 – при условии  $R_{п} = \text{const}$ ,  $R_{щ} = \text{var}$  (от 0 до  $\infty$ ).

Эти зависимости можно получить, анализируя формулы (4.57) и (4.58) или построив граничные искусственные характеристики, соответствующие предельным значениям (нулю и бесконечности) сопротивлений резисторов  $R_{щ}$  и  $R_{п}$ .

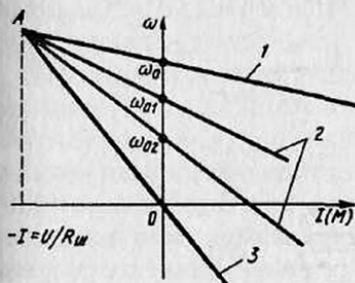


Рис. 4.22

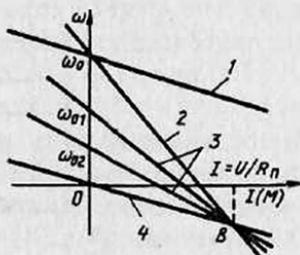


Рис. 4.23

Рассмотренный способ регулирования скорости имеет следующие показатели: диапазон регулирования скорости 5...6; плавность регулирования, определяемую плавностью изменения сопротивлений  $R_{щ}$  и  $R_{п}$ ; регулирование осуществляется вниз от основной скорости при постоянном моменте нагрузки; жесткость получаемых искусственных характеристик относительно высокая в области малых скоростей.

Экономичность этого способа невысока из-за значительных потерь мощности в цепи якоря, поэтому он используется для регулирования скорости двигателей небольшой мощности или при кратковременной работе ЭП на пониженных скоростях.

#### 4.10. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ В СИСТЕМЕ «ИСТОЧНИК ТОКА – ДВИГАТЕЛЬ»

В рассмотренных ранее схемах системы «преобразователь – двигатель» якорь питался от преобразователя со свойствами источника напряжения. Такой преобразователь имеет небольшое (в идеале нулевое) собственное внутреннее сопротивление, за счет чего падение напряжения в нем при протекании тока также невелико и подаваемое на двигатель напряжение изменяется мало. В пределе при нулевом внутреннем сопротивлении преобразователя напряжение

на его выходе постоянно и не зависит от тока нагрузки. Вольт-амперная характеристика идеального преобразователя со свойствами источника напряжения показана на рис. 4.24 горизонтальной линией 1.

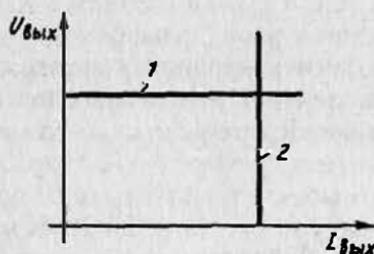


Рис. 4.24

В последние годы широкое распространение в электроприводе находят и преобразователи со свойствами источника тока. Они характеризуются тем, что выдают в нагрузку мало изменяющийся (в идеале постоянный) ток (прямая 2 на рис. 4.24). Двигатель, питаемый от такого преобразователя, приобретает специфические характеристики и возможности по регулированию координат [6] и, в первую очередь, момента.

Схема системы, получившей название «источник тока – двигатель» (ИТ – Д), показана на рис. 4.25, а. В этой схеме якорь двигателя 2 подключен к источнику тока 1 и обтекается постоянным током. Значение тока в обмотке возбуждения 3 и его направление могут изменяться с помощью потенциометра 4 и контактов  $K1$  и  $K2$ . Так как  $I = \text{const}$ , электрохимическая характеристика двигателя будет представлять собой вертикальную прямую линию (см. рис. 4.25, б).

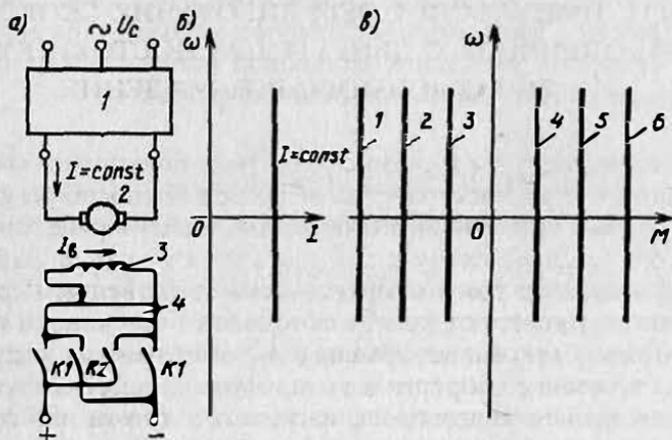


Рис. 4.25

Семейство механических характеристик легко получить на основании формулы (4.3). Из нее видно, что при  $I = \text{const}$  момент двигателя и его направление определяются соответственно значением магнитного потока и его знаком. Таким образом, если с помощью потенциометра 4 (см. рис. 4.25, а) и контактов  $K1$  и  $K2$  изменять значение тока возбуждения и его направление, а тем самым и магнитный поток  $\Phi$ , можно получить механические характеристики в виде прямых 1...6 при различных магнитных потоках от  $-\Phi_1$  до  $+\Phi_6$  (см. рис. 4.25, в). Такие характеристики обеспечивают постоянство момента на валу двигателя при любой его скорости, а ЭП приобретает свойства источника момента, управляемого по цепи возбуждения.

В каких же случаях могут потребоваться механические характеристики такого вида? Вспомним, что одна из функций ЭП связана с обеспечением регулируемого по значению усилия или момента для создания на исполнительном органе рабочей машины требуемого натяжения в обрабатываемом или изготавливаемом материале или изделии (производство листового металла, проводов, бумаги, текстильного полотна и др.). Очевидно, что ЭП с такими механическими характеристиками наиболее просто обеспечит выполнение этой функции, а также позволит получить постоянные по значению ускорения или замедления движения.

В системе «ИТ – Д» для регулирования скорости может быть сформирован и горизонтальный участок механических характеристик. Это достигается введением обратных связей (в частности, нелинейной отрицательной обратной связи по скорости двигателя). Такая замкнутая схема ЭП рассмотрена в гл. 11.

#### 4.11. ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В последние годы в связи с развитием полупроводниковой техники получил распространение импульсный способ регулирования скорости ЭП, применение которого позволяет в ряде случаев упростить его силовую схему и повысить надежность ее работы. Этот способ является к тому же практически единственным при питании двигателя от нерегулируемого источника постоянного тока (аккумуляторной батареи, неуправляемого выпрямителя и др.).

Регулирование скорости в этом случае осуществляется импульсным изменением напряжения, магнитного потока или сопротивления резистора в якорной цепи, т. е. рассмотренными ранее основными способами получения искусственных характеристик двигателя.

Импульсное регулирование осуществляется с помощью управляемых полупроводниковых ключей любого типа. Основным показателем работы ключа является заполнение (скважность его работы), определяемое отношением времени его замкнутого состояния к периоду коммутации:

$$\gamma = t_3 / T_k = t_3 / (t_3 + t_0), \quad (4.59)$$

где  $t_0$  – время разомкнутого состояния ключа;  $t_3$  – время замкнутого состояния ключа.

На практике применяются два основных способа управления ключом – широтно-импульсная и частотно-импульсная модуляции. При широтно-импульсной модуляции период коммутации ключа  $T_k$  остается постоянным, а изменяется время его замкнутого состояния  $t_3$ , т.е. изменяется ширина импульсов при неизменном периоде (частоте) их следования.

При частотно-импульсной модуляции время  $t_3$  остается неизменным, а меняется период коммутации ключа  $T_k$ , который обратно пропорционален частоте коммутации. Заметим, что при обоих способах управления ключом меняется заполнение  $\gamma$ , т.е. заполнение оказывается универсальным показателем и им удобно пользоваться при анализе импульсных способов регулирования координат.

Импульсное регулирование сопротивления добавочного резистора в цепи якоря, схема реализации которого и соответствующие характеристики приведены на рис. 4.26, осуществляется путем периодической коммутации (замыкания и размыкания) по определенному закону ключа 1, включенного параллельно резистору 2 с сопротивлением  $R_d$ .

Семейство механических характеристик ДПТНВ при импульсном регулировании получим, проанализировав граничные режимы

работы ключа 1: его постоянно разомкнутое и постоянно замкнутое состояния. При  $\gamma = 1$  резистор 2 выведен из цепи якоря 3 и двигатель, следовательно, работает на естественной механической характеристике 4. Если  $\gamma = 0$ , резистор 2 введен в цепь якоря и двигатель работает по искусственной характеристике 6. При  $0 < \gamma < 1$  механические характеристики 5 располагаются между двумя граничными характеристиками.

Математическое выражение для семейства характеристик, показанных на рис. 4.26, приведем без вывода:

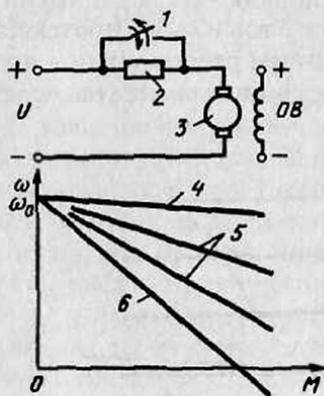


Рис. 4.26

$$\omega = U / (k\Phi) - M (R_d(1-\gamma) + R_a) / (k\Phi)^2.$$

При импульсном регулировании магнитного потока двигателя, схема которого и соответствующие характеристики приведены на рис. 4.27, в цепь обмотки возбуждения 4 включен добавочный резистор 3, шунтированный ключом 2. Заполнение  $\gamma$  ключа может регулироваться в пределах от 0 до 1. Проанализировав и в этом случае предельные режимы работы ключа 2, получим семейство искусственных характеристик. При  $\gamma = 1$  ключ постоянно замкнут, резистор 3 зашунтирован, по обмотке возбуждения 4 протекает номинальный ток и двигатель 1 работает по естественной характеристике 7. При  $\gamma = 0$  ключ 2 постоянно разомкнут, резистор 3 введен в цепь обмотки возбуждения 4, ток возбуждения и магнитный поток уменьшаются и двигатель работает по искусственной характеристике 5. При значениях  $0 < \gamma < 1$  двигатель работает на промежуточных характеристиках 6.

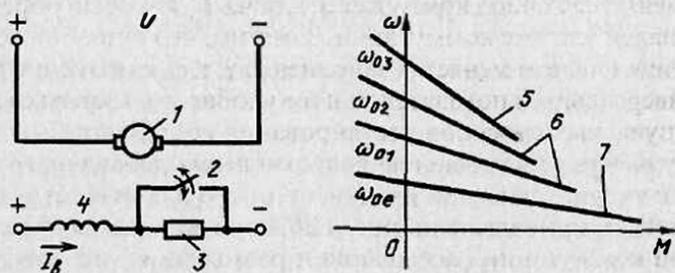


Рис. 4.27

При импульсном регулировании напряжения на якоре двигателя, схема которого и соответствующие характеристики приведены на рис. 4.28, ключом 1 якорь 2 периодически подключается к источнику с напряжением  $U_c$ . При замкнутом ключе 1 ток в якоре протекает под действием напряжения  $U_c$  источника, а при разомкнутом – под действием наводимой в якоре ЭДС самоиндукции, замыкаясь через

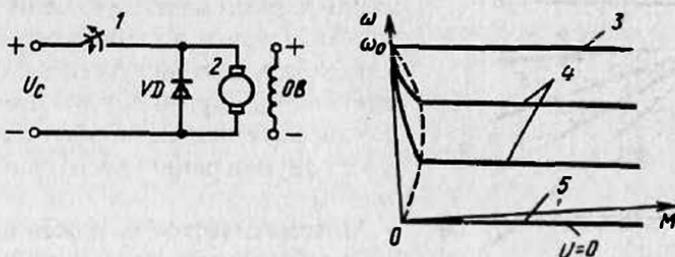


Рис. 4.28

диод  $VD$ . Ток в якоре имеет при этом пульсирующий характер. Регулируя заполнение ключа, можно получать различные механические характеристики двигателя.

При  $\gamma = 1$  на якорь постоянно подается полное напряжение источника и двигатель работает по естественной характеристике 3. Если  $\gamma = 0$ , то напряжение не поступает на якорь, двигатель оказывается включенным по схеме динамического торможения и его механическая характеристика 5 проходит через начало координат. Промежуточным значениям заполнения  $0 < \gamma < 1$  соответствует работа двигателя на механических характеристиках 4, располагающихся между двумя граничными характеристиками.

При импульсном регулировании напряжения возможен режим прерывистого тока, в области расположения которого (слева от штриховой линии) характеристики двигателя криволинейны. Математическое выражение для прямолинейных участков характеристик двигателя имеет вид

$$\omega = \gamma U_c / (k\Phi) - MR_{я} / (k\Phi)^2.$$

В схемах импульсного регулирования современных ЭП применяются бесконтактные полупроводниковые ключи, обычно тиристорные. Работу такого ключа поясним на примере схемы импульсного регулирования сопротивления добавочного резистора, включенного в цепь постоянного тока (рис. 4.29, а). Роль ключа в этой схеме выполняет тиристор  $VS1$ , включенный параллельно резистору  $R_d$ . Открываясь, тиристор шунтирует резистор  $R_d$ , закрываясь, тиристор вводит в электрическую цепь этот резистор. Для выключения тиристора  $VS1$  необходимо обеспечить более высокий (положительный) потенциал катода по сравнению с потенциалом анода. В рассматриваемой схеме это достигается благодаря использованию вспомогательного тиристора  $VS2$  и коммутирующих элементов – конденсатора  $C_k$ , реактора  $L_k$ , диода  $VD_k$ , маломощного ис-

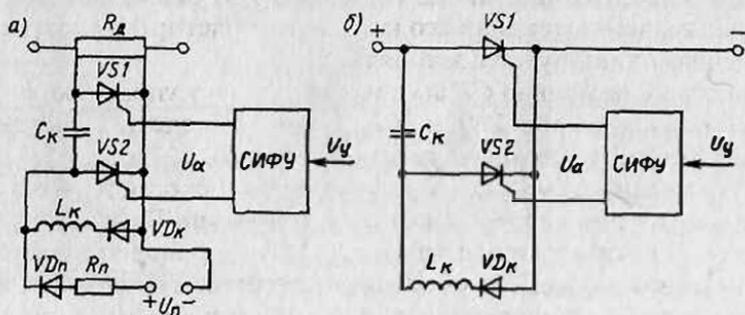


Рис. 4.29

точника постоянного тока с напряжением  $U_n$ , диода  $VD_n$  и резистора  $R_n$ . Управление тиристорами  $VS1$  и  $VS2$  осуществляется СИФУ, которая подает на них импульсы управления  $U_\alpha$  с необходимой частотой и последовательностью.

Допустим, что в исходном положении тиристор  $VS1$  открыт, тиристор  $VS2$  закрыт, а конденсатор  $C_k$  заряжен от источника питания с напряжением  $U_n$  со знаком «+» на нижней обкладке. Закрытие тиристора  $VS1$  происходит путем подачи импульса на тиристор  $VS2$ . Последний открывается и пропускает к катоду тиристора  $VS1$  «+» напряжения конденсатора  $C_k$ , а к аноду — «-» этого напряжения. После закрытия  $VS1$  конденсатор  $C_k$  заряжается через открытый тиристор  $VS2$  с плюсом на верхней обкладке. Если теперь снять импульс управления с  $VS2$ , то он к концу заряда конденсатора закроется. При последующей подаче импульса на  $VS1$  он вновь откроется, замыкая накоротко резистор  $R_n$ , при этом вновь начнется перезарядка конденсатора по цепи  $C_k - VS1 - VD_k - L_k$ , которая будет идти до тех пор, пока потенциал его нижней обкладки не станет положительным. Описанный процесс работы схемы повторится, если опять открыть тиристор  $VS2$ , и т.д. Для первоначальной зарядки конденсатора  $C_k$  служит источник тока с напряжением  $U_n$  и элементы  $VD_n$  и  $R_n$ .

На рис. 4.29, б представлена еще одна распространенная схема тиристорного ключа, которая обычно используется для импульсного регулирования напряжения. В этой схеме нет дополнительного источника постоянного тока, поскольку предварительная зарядка конденсатора  $C_k$  с плюсом на верхней обкладке происходит от напряжения сети при открытии тиристора  $VS2$ . Тиристор  $VS1$  при этом открыт и двигатель отключен от сети. При подаче управляющего импульса  $U_\alpha$  на тиристор  $VS1$  он открывается, и на двигатель подается напряжение. Одновременно через этот тиристор и элементы  $VD_k$  и  $L_k$  начинается перезарядка конденсатора  $C_k$  уже с минусом на верхней обкладке. Поэтому при последующем открытии тиристора  $VS2$  потенциал анода тиристора  $VS1$  окажется более отрицательным, чем потенциал его катода, и тиристор  $VS1$  закроется. В дальнейшем цикл будет повторяться.

Изменяя с помощью СИФУ интервал между управляющими импульсами тиристоров  $VS1$  и  $VS2$ , можно обеспечить импульсное регулирование напряжения на двигателе.

Показатели импульсного регулирования скорости в основном такие же, как при непрерывном регулировании. Вместе с тем энергетические показатели импульсных электроприводов постоянного тока несколько хуже. Это объясняется наличием в кривой тока якоря переменной составляющей, что приводит к дополнительным потерям энергии в двигателе.

#### 4.12. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ, СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В ЭП электрического транспорта и ряда грузоподъемных машин и механизмов нашли широкое применение двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТПВ), схема включения и кривая намагничивания которых показаны на рис. 4.30. Основной особенностью этих двигателей является включение обмотки возбуждения 2 последовательно с обмоткой якоря 1 и добавочным резистором 3, вследствие чего ток якоря одновременно является и током возбуждения.

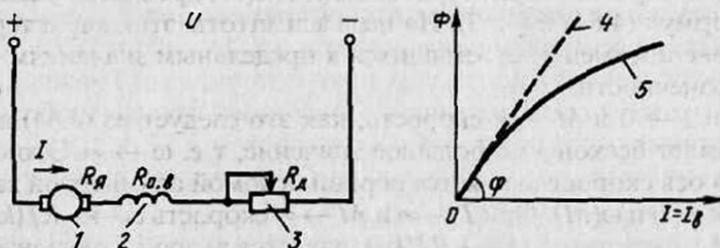


Рис. 4.30

Согласно (4.1) ... (4.3) электромеханическая и механическая характеристики двигателя выражаются формулами

$$\omega = (U - IR) / [k\Phi(I)]; \quad (4.60)$$

$$\omega = U / [k\Phi(I)] - MR / [k\Phi(I)]^2, \quad (4.61)$$

в которых дополнительно показана зависимость магнитного потока от тока якоря (возбуждения)  $\Phi(I)$ , а  $R = R_{я} + R_{об.б} + R_{д}$ .

Магнитный поток и ток связаны между собой кривой намагничивания 5, описав которую с помощью приближенного аналитического выражения, можно получить формулы для характеристик двигателя.

В простейшем случае кривую намагничивания представляют прямой линией 4. Такая аппроксимация по существу означает пренебрежение насыщением магнитной системы двигателя и позволяет представить зависимость потока от тока следующим образом:

$$\Phi = aI, \quad (4.62)$$

где  $a = \operatorname{tg} \varphi$ .

При линейной аппроксимации момент, как это следует из (4.3), является квадратичной функцией тока:

$$M = k\Phi I = kaI^2. \quad (4.63)$$

Подставив (4.62) в (4.60), получим следующее выражение для электромеханической характеристики двигателя:

$$\omega = U/(kaI) - R/(ka). \quad (4.64)$$

Выразив в (4.64) ток через момент с помощью (4.63), получим следующее выражение для механической характеристики:

$$\omega = U/\sqrt{kaM} - R/(ka). \quad (4.65)$$

Для построения характеристик  $\omega(I)$  и  $\omega(M)$  проведем краткий анализ формул (4.64) и (4.65). Найдем асимптоты этих характеристик, при токе и моменте, стремящихся к предельным значениям – нулю и бесконечности.

При  $I \rightarrow 0$  и  $M \rightarrow 0$  скорость, как это следует из (4.64) и (4.65), принимает бесконечно большое значение, т.е.  $\omega \rightarrow \infty$ . Это означает, что ось скорости является первой искомой асимптотой характеристик  $\omega(I)$  и  $\omega(M)$ . При  $I \rightarrow \infty$  и  $M \rightarrow \infty$  скорость  $\omega \rightarrow -R/(ka)$ , т.е. прямая с ординатой  $\omega_a = -R/(ka)$  является второй, горизонтальной асимптотой этих характеристик.

Зависимости  $\omega(I)$  и  $\omega(M)$  в соответствии с (4.64) и (4.65) имеют при этом гиперболический характер, что позволяет с учетом сделанного анализа представить их в виде кривых, показанных на рис. 4.31.

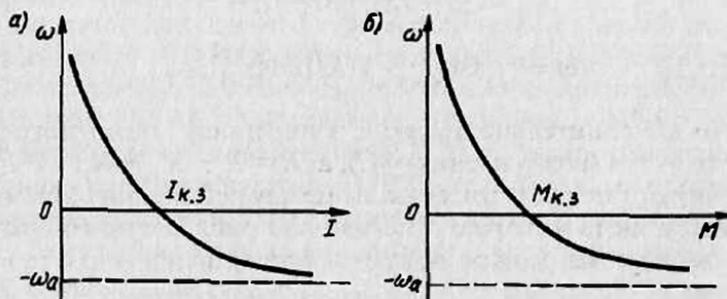


Рис. 4.31

Особенность полученных характеристик состоит в том, что при небольших токах и моментах двигателя, соответствующих малым моментам нагрузки, его скорость принимает большие значения, при этом характеристики не пересекают ось скорости. Таким образом,

для двигателя последовательного возбуждения, включенного по основной схеме (см. рис. 4.30), не существуют режимы холостого хода и генератора, работающего параллельно с сетью (или режима рекуперативного торможения), так как характеристики во втором квадранте не проходят.

Это объясняется тем, что при  $I, M \rightarrow 0$  магнитный поток  $\Phi \rightarrow 0$ , а следовательно, в соответствии с (4.1)  $E \rightarrow U$ . Другими словами, при любой скорости  $E < U$ , в силу чего отдачи энергии в сеть происходить не может. Отметим, что из-за наличия в двигателе потока остаточного намагничивания  $\Phi_{ост}$  практически скорость холостого хода существует и равна в этом случае отношению  $U / (k\Phi_{ост})$ .

Остальные режимы работы ДПТПВ аналогичны режимам работы ДПТНВ: двигательный режим имеет место при  $0 < \omega < \infty$ , режим короткого замыкания при  $\omega = 0$ , а режим генератора, включенного последовательно с сетью (торможение противовключением), при  $\omega < 0$ . Кроме того, ДПТПВ может работать в генераторном режиме независимо от сети постоянного тока (динамическое торможение), подробно рассмотренном далее в разд. 4.15.

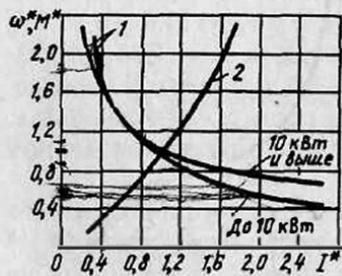


Рис. 4.32

Выражения (4.64) и (4.65) являются приближенными и не могут быть использованы для точных инженерных расчетов. Причина этого заключается в принятой линейной аппроксимации кривой намагничивания, в то время как реально двигатели работают в области насыщенной магнитной системы. Поэтому для точных практических расчетов используются так называемые универсальные характеристики ДПТПВ, приведенные на рис. 4.32. Они представляют собой зависимости относительных скорости  $\omega^* = \omega / \omega_{ном}$  (кривые 1) и момента  $M^* = M / M_{ном}$  (кривая 2) от относительного тока  $I^* = I / I_{ном}$ . Для получения характеристик с большей точностью зависимость  $\omega^*(I^*)$  представляется двумя кривыми — для двигателей до 10 кВт и двигателей на 10 кВт и выше. Рассмотрим использование этих характеристик на конкретном примере.

**Задача 4.13\*.** Рассчитать и построить естественные характеристики ДПТПВ типа ДЗ1, имеющего следующие данные:  $P_{ном} = 8$  кВт;  $n_{ном} = 800$  об/мин;  $U_{ном} = 220$  В;  $I_{ном} = 46,5$  А;  $\eta_{ном} = 0,78$ .

Определим номинальные скорость и момент:

$$\omega_{ном} = 2\pi n_{ном} / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 800 / 60 = 83,7 \text{ рад / с ;}$$

$$M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном} = 8000 / 83,7 = 95,5 \text{ Н \cdot м.}$$

Задаваясь относительными значениями тока  $I^*$ , по универсальным характеристикам ДПТТВ (см. рис. 4.32) найдем относительные значения момента  $M^*$  и скорости  $\omega^*$ . Затем, умножая относительные значения переменных на их номинальные значения, получим точки для построения искомых характеристик двигателя:

$I^*$ .....	0,4	0,8	1,2	1,6	2
$M^*$ .....	0,3	0,7	1,3	1,9	2,6
$\omega^*$ .....	1,8	1,1	0,9	0,8	0,6
$\omega = \omega^* \omega_{ном}$ , рад/с.....	151	92	75	63	50
$M = M^* M_{ном}$ , Н·м.....	28,7	66,9	124	181	248
$I = I^* I_{ном}$ , А.....	18,6	37,2	55,8	74,7	93

По полученным данным построим естественные электромеханическую (кривая 1) и механическую (кривая 3) характеристики двигателя (рис. 4.33), а также искусственную характеристику 2.

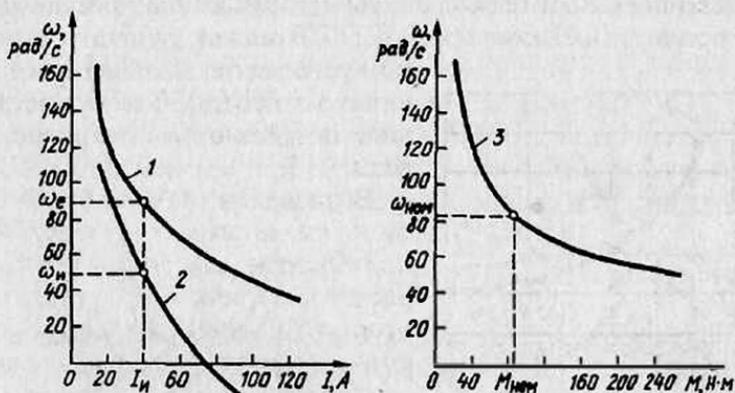


Рис. 4.33

Регулирование координат двигателя в соответствии с выражениями (4.64) и (4.65) может осуществляться с помощью добавочных резисторов в цепи якоря, изменением магнитного потока двигателя и подводимого к нему напряжения.

#### 4.13. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РЕЗИСТОРОВ. РАСЧЕТ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Регулирование тока, момента и скорости двигателя с помощью резисторов отличается в первую очередь простотой своей реализации (см. рис. 4.30).

Для получения семейства искусственных характеристик двигателя при  $R_d = \text{var}$  проведем анализ выражений (4.64) и (4.65).

Так как при  $I, M \rightarrow 0$  магнитный поток  $\Phi \rightarrow 0$ , а  $\omega \rightarrow \infty$ , то все искусственные характеристики имеют своей вертикальной асимптотой ось скорости. Для определения их расположения относительно естественной характеристики выполним следующие преобразования. Используя (4.64), запишем значения скорости двигателя на естественной и искусственной характеристиках при каком-то любом фиксированном токе якоря  $I_n$ . Найдем отношение этих скоростей, отметив, что поскольку ток один и тот же, то и магнитный поток в том и другом случаях одинаков, а значит, его можно сократить. После простых преобразований получим

$$\omega_n = \omega_e \left( \frac{U_{\text{ном}} - I_n (R_r + R_{\text{о.в}} + R_d)}{U_{\text{ном}} - I_n (R_r + R_{\text{о.в}})} \right). \quad (4.66)$$

Выражение (4.66) позволяет определить расположение искусственных электромеханических характеристик относительно естественной, так как числитель при  $R_d > 0$  всегда меньше знаменателя, то и  $\omega_n < \omega_e$ . Другими словами, искусственные электромеханические характеристики 2 при введении в якорь добавочного резистора располагаются ниже естественной 1, причем чем больше  $R_d$ , тем больше снижается скорость (рис. 4.34, а).

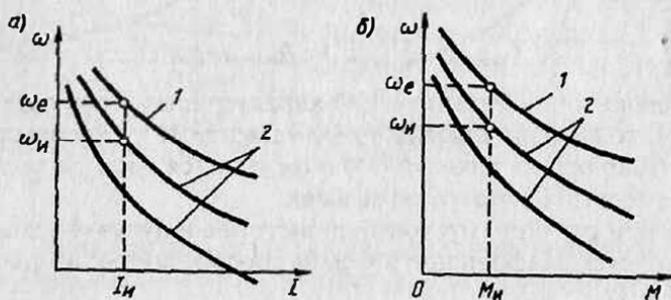


Рис. 4.34

Аналогичный анализ, проведенный для искусственных механических характеристик, показывает, что они подчиняются той же закономерности (см. рис. 4.34, б).

Регулирование скорости двигателя данным способом характеризуется следующими показателями: диапазон 2...3; направление регулирования скорости – вниз; плавность регулирования, определяемая плавностью изменения  $R_d$ ; стабильность скорости, снижающаяся по мере увеличения  $R_d$ ; допустимая нагрузка – постоянный момент, равный номинальному; экономическая целесообразность при небольших диапазонах регулирования скорости или кратковременной работе на пониженных скоростях.

Регулирование тока и момента с помощью резисторов характеризуется невысокой точностью при простой схемной реализации.

Рассмотрим способы расчета регулировочных резисторов, включение которых в цепь якоря двигателя позволяет получить требуемую искусственную (одну или несколько) электромеханическую или механическую характеристику. Задача в этом случае формулируется так: при известных паспортных данных двигателя и его естественной характеристике определить значение сопротивления резистора  $R_d$ , которое обеспечит прохождение электромеханической или механической характеристики через точку с координатами  $(\omega_n, I_n)$  или  $(\omega_n, M_n)$ .

Наиболее простой путь решения этой задачи предусматривает использование формулы (4.66), из которой

$$R_d = (1 - \omega_n / \omega_c) (U_{ном} / I_{ном} - R_{я} - R_{о.в}). \quad (4.67)$$

Теперь при заданных координатах  $(\omega_n, I_n)$  рассчитать  $R_d$  просто: по естественной характеристике для заданного тока  $I_n$  определяют скорость  $\omega_c$  и все имеющиеся данные подставляют в (4.67).

Отметим, что необходимые для расчета значения  $R_d$  и  $R_{о.в}$  могут быть найдены по справочникам, экспериментально или приближенно по формуле

$$R_d + R_{о.в} \approx 0,75 U_{ном} (1 - \eta_{ном}) / I_{ном}. \quad (4.68)$$

Если задана точка механической характеристики с координатами  $(\omega_n, M_n)$ , то сначала по заданному моменту  $M_n$  с помощью универсальной характеристики  $M^*(I^*)$  определяется ток  $I_n$ , а затем повторяется расчет, рассмотренный выше.

Иногда при расчетах пусковых резисторов и пусковой диаграммы используется графоаналитический способ, подробно рассмотренный в [1,7].

**Задача 4.14\*.** Для двигателя Д31 (данные см. в задаче 4.13) рассчитать сопротивление добавочного резистора  $R_d$ , при включении которого электромеханическая характеристика пройдет через точку с координатами  $\omega_n = 50$  рад/с,  $I_n = 40$  А, и построить эту характеристику.

Определим суммарное сопротивление обмоток якоря и возбуждения двигателя по (4.68):

$$R_d + R_{о.в} \approx 0,75 U_{ном} (1 - \eta_{ном}) / I_{ном} = 0,75 \cdot 220 (1 - 0,78) / 46,5 = 0,78 \text{ Ом.}$$

По естественной характеристике  $I$  (см. рис. 4.33) для тока  $I_n = 40$  А найдем  $\omega_c = 90$  рад/с.

Подставив все имеющиеся данные в (4.67), получим

$$R_d = (1 - \omega_n / \omega_c) (U_{ном} / I_{ном} - R_{я} - R_{о.в}) = (1 - 50/90) (220/40 - 0,78) = 2,1 \text{ Ом.}$$

Для ряда значений тока по естественной характеристике  $I$  (см. рис. 4.33) определим значения скорости  $\omega$ . Далее по (4.66) вычислим скорости  $\omega_n$  на искусственной характеристике при тех же токах. Используем полученные данные для построения искусственной электромеханической характеристики 2:

$I, A$ .....	20	40	60	80	100
$\omega_e, \text{рад/с}$ .....	130	90	74	60	48
$\omega_n, \text{рад/с}$ .....	103	50	20	-4	-23

**Задача 4.15.** Для двигателя Д31 (см. задачу 4.13) рассчитать  $R_d$ , включение которого в цепь якоря позволит снизить скорость двигателя в три раза при номинальном моменте нагрузки.

**Задача 4.16.** Для двигателя Д31 (см. задачу 4.13) найти сопротивление резистора  $R_d$ , включение которого позволит снизить ток двигателя в первый момент пуска до уровня  $2I_{ном}$ .

**Задача 4.17.** Для двигателя Д31 (см. задачу 4.13) определить сопротивление резистора  $R_d$ , при включении которого механическая характеристика двигателя пройдет через точку с координатами  $\omega_n = 0,2\omega_{ном}$ ,  $M_n = 0,9 M_{ном}$ .

#### 4.14. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ИЗМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И ШУНТИРОВАНИЕМ РЕЗИСТОРОМ ЯКОРЯ

Регулирование скорости изменением магнитного потока производится по схеме рис. 4.35, а, в которой для этого изменяется сопротивление резистора 2, включенного параллельно обмотке возбуждения 3 двигателя. Отметим, что регулирование магнитного потока для этого типа двигателей постоянного тока не является полностью независимым, так как ток возбуждения при этом пропорционален току якоря  $I$ , определяемому нагрузкой ЭП.

Для определения вида и расположения искусственных механических характеристик двигателя, получаемых при различных со-

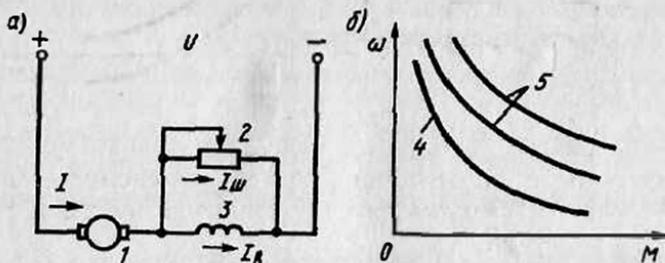


Рис. 4.35

противлениях  $R_m$  шунтирующего резистора 2, проведем следующий анализ.

При  $R_m = \infty$  (разрыв шунтирующей цепи) двигатель оказывается включенным по своей основной схеме, чему соответствует естественная характеристика 4 (см. рис. 4.35, б).

При  $0 < R_m < \infty$  часть тока якоря поступает в шунтирующую цепь ( $I_m \neq 0$ ), поэтому ток возбуждения  $I_a$  и магнитный поток  $\Phi$  уменьшаются, что в соответствии с (4.60) и (4.61) вызывает увеличение скорости двигателя, при этом искусственные механические характеристики 5 располагаются выше естественной.

При  $M \rightarrow 0, I \rightarrow 0, I_a \rightarrow 0, \Phi \rightarrow 0$  и скорость  $\omega \rightarrow \infty$ , т.е. и в этом случае ось скорости является асимптотой для всех искусственных механических характеристик.

Показатели регулирования скорости ДПТПВ этим способом совпадают с показателями ДПТНВ.

При регулировании скорости изменением напряжения, схема реализации и характеристики которого приведены на рис. 4.36, двигатель 2 подключается к управляемому выпрямителю 1. Выходное напряжение этого выпрямителя  $U$  регулируется в соответствии с изменением входного управляющего сигнала  $U_y$ . При  $U = U_{ном}$  и без учета внутреннего сопротивления управляемого выпрямителя двигатель работает по естественной характеристике 3. При снижении напряжения в соответствии с (4.60) и (4.61) его скорость снижается и искусственные характеристики 4 будут располагаться ниже естественной. При  $I \rightarrow 0, M \rightarrow 0, \Phi \rightarrow 0$  скорость  $\omega \rightarrow \infty$ , т.е. ее ось является асимптотой характеристик двигателя.

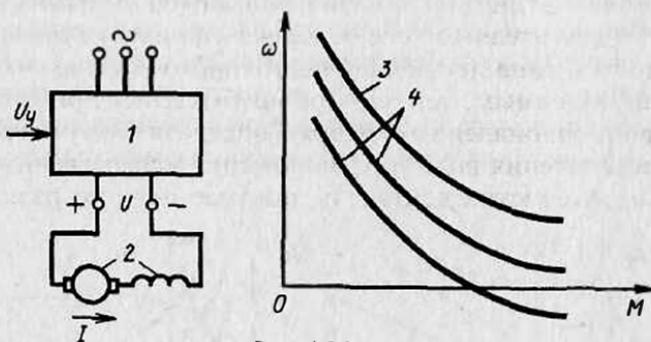


Рис. 4.36

Показатели регулирования скорости изменением напряжения ДПТПВ соответствуют показателям двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Регулирование скорости шунтированием якоря резистором используется для получения пониженных скоростей ЭП с ДПТПВ и опре-

деленной скорости его идеального холостого хода. Наибольшее распространение получила схема (рис. 4.37), в которой шунтирующий якорь 1 резистор  $R_{ш}$  и последовательно включенный резистор  $R_n$  вместе с обмоткой возбуждения 2 образуют делитель напряжения. За счет этого к якорю двигателя подводится пониженное напряжение и его характеристики будут располагаться ниже естественной.

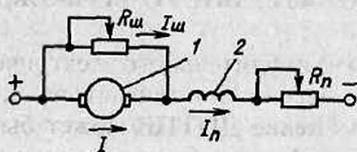


Рис. 4.37

Особенностью рассматриваемой схемы является также то, что при нулевом токе якоря ток возбуждения за счет наличия резистора  $R_{ш}$  не равен нулю, поэтому отличен от нуля магнитный поток и двигатель имеет определенную скорость идеального холостого хода  $\omega_0$ .

При скорости двигателя больше  $\omega_0$  ток в якоре меняет свое направление, и ток возбуждения по мере роста скорости уменьшается. При стремлении тока якоря к значению  $I = + U/R_{ш}$  ток возбуждения и магнитный поток стремятся к нулю, а скорость — к бесконечности. Другими словами, вертикальная линия с абсциссой  $I = - U/R_{ш}$  является асимптотой электромеханической характеристики  $I$  (рис. 4.38).

Для получения механической характеристики во втором квадранте обратимся к формуле электромагнитного момента двигателя (4.3). При  $\omega = \omega_0$  ток  $I = 0$  и момент  $M = 0$ , а при  $I \rightarrow - U/R_{ш}$  поток  $\Phi \rightarrow 0$  и момент  $M \rightarrow 0$ , т.е. ось скорости является вертикальной асимптотой механической характеристики. Момент двигателя, равный нулю при  $\omega = 0$  и  $\omega \rightarrow \infty$ , в промежуточном интервале скорости

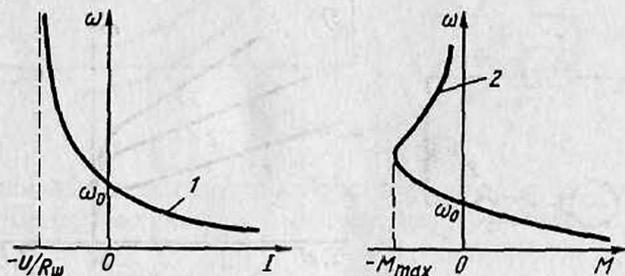


Рис. 4.38

имеет максимум  $M_{\max}$ . Проведенный анализ позволяет представить искусственную механическую характеристику двигателя в виде кривой 2.

#### 4.15. ТОРМОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Для осуществления принудительного электрического торможения двигатель необходимо перевести в генераторный режим работы.

Динамическое торможение ДПТПВ может быть реализовано по двум схемам – с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

Динамическое торможение ДПТПВ с независимым возбуждением реализуется по схеме, приведенной на рис. 4.2, и по своей сути аналогично динамическому торможению ДПТНВ. Характеристики двигателя в этом случае описываются уравнениями (4.9) и (4.10) и имеют вид прямых 1...3, проходящих через начало координат (рис. 4.39). Из этих уравнений также видно, что с увеличением сопротивления резистора  $R_d$  наклон характеристик к горизонтальной оси увеличивается.

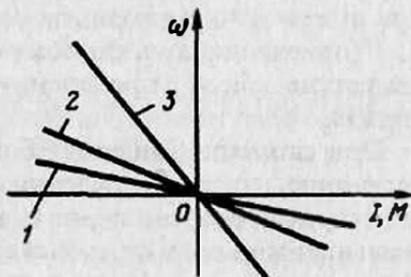


Рис. 4.39

Динамическое торможение ДПТПВ с самовозбуждением реализуется по схеме, приведенной на рис. 4.40, а, при последовательном соединении обмоток якоря 1, возбуждения 2 и резистора 3 (резистор может отсутствовать).

Для возникновения и существования режима самовозбуждения необходимо выполнение следующих условий: наличие остаточно-

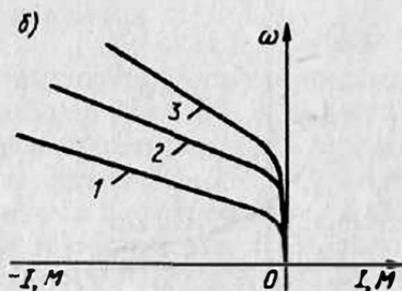
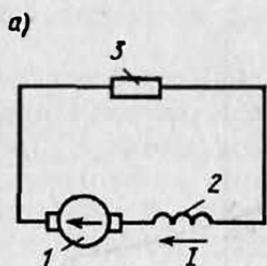


Рис. 4.40

го магнитного потока  $\Phi_{ост}$  в двигателе; совпадение по направлению  $\Phi_{ост}$  и основного магнитного потока  $\Phi$ , создаваемого током возбуждения; сопротивление цепи обмотки якоря (с учетом сопротивления  $R_d$  резистора 3) меньше критического.

Динамическое торможение ДПТТВ с самовозбуждением происходит следующим образом. При наличии остаточного магнитного поля и вращении якоря в якоре наводится ЭДС, под действием которой по якору и обмотке возбуждения двигателя начинает протекать ток. Этот ток создает основной магнитный поток  $\Phi$ , который, совпадая по направлению с остаточным потоком  $\Phi_{ост}$ , приводит к увеличению ЭДС, а значит, и влечет за собой увеличение тока в двигателе. Такой процесс самовозбуждения будет продолжаться до тех пор, пока ЭДС не станет равной суммарному падению напряжения в цепи якоря.

Универсальные характеристики 1...3 ДПТТВ в режиме торможения, соответствующие различным сопротивлениям резистора 3  $R_{d1} < R_{d2} < R_{d3}$ , показаны на рис. 4.40, б.

Торможение противовключением ДПТТВ, схема которого приведена на рис. 4.41, а, осуществляется изменением полярности напряжения на обмотке якоря при сохранении того же направления тока в обмотке возбуждения (или наоборот). При этом в соответствии с (4.3) изменяется знак момента двигателя. Для ограничения тока в этом режиме торможения в цепь якоря 1 вводится дополнительный резистор 2.

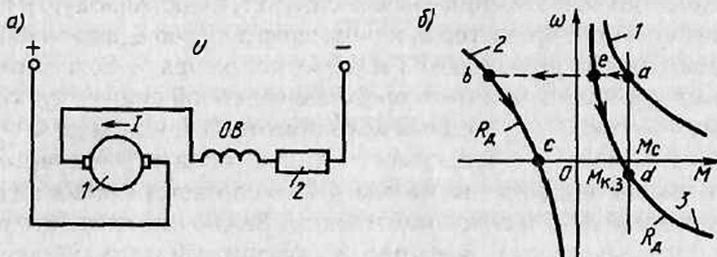


Рис. 4.41

Процесс торможения иллюстрируют характеристики, показанные на рис. 4.41, б. До торможения двигатель работал в точке *a* характеристики 1, преодолевая момент сопротивления  $M_c$ . После изменения полярности напряжения на обмотке якоря и ввода в его цепь добавочного резистора с сопротивлением  $R_d$  двигатель переходит на работу по характеристике 2 (точка *b*). Начинается процесс торможения противовключением, которому соответствует участок *bc*. В точке *c* торможение заканчивается (скорость двигателя равна нулю), и схема управления отключает двигатель от сети.

Торможение противовключением также реализуется и в том случае, когда двигатель нагружен активным моментом  $M_c$ , превышающим момент короткого замыкания  $M_{к.з}$ . Рассмотрим этот вариант торможения с помощью рис. 4.41, б.

Допустим, что двигатель в исходном режиме работает в точке  $a$  на характеристике 1, преодолевая активный момент нагрузки  $M_c$ . Если теперь, не изменяя полярность напряжения на обмотке якоря, ввести в якорную цепь дополнительный резистор  $R_d$ , то двигатель будет работать по характеристике 3 (точка  $e$ ). Так как момент двигателя при этом станет меньше момента нагрузки, то он начнет сначала тормозиться, а затем под действием активного момента нагрузки  $M_c > M_{к.з}$  разгоняться в противоположном направлении до тех пор, пока в точке  $d$  моменты нагрузки и двигателя не сравняются. Двигатель при этом будет работать в режиме торможения противовключением. Такой способ торможения часто используется в ЭП грузоподъемных машин и механизмов, создающих на валу двигателя активный момент нагрузки.

#### 4.16. СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

ДПТСВ, схема включения которого показана на рис. 4.42, а, имеет две обмотки возбуждения – независимую 1, подключаемую к источнику питания через резистор 2, и последовательную 4, включаемую последовательно с резистором 3 и обмоткой якоря 5. Вследствие этого магнитный поток двигателя представляет собой сумму двух составляющих – потока  $\Phi_{о.в.н}$ , создаваемого обмоткой 1, и потока  $\Phi_{о.в.п}$ , создаваемого обмоткой 4. Зависимость этих потоков и суммарного потока  $\Phi$  от тока якоря показана на рис. 4.42, б соответственно в виде штриховых линий 3 и 2 и сплошной линии 1. Важно отметить, что при токе якоря, стремящемся к значению  $-I_1$ , магнитный поток  $\Phi$  стремится к нулю, т.е. двигатель размагничивается.

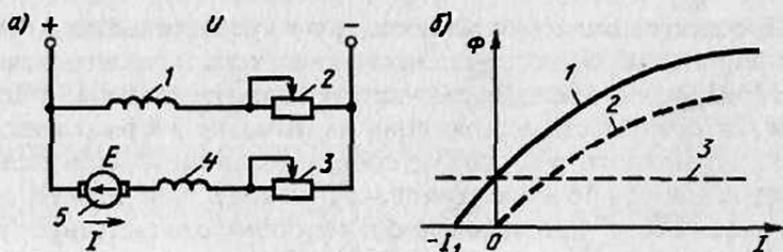


Рис. 4.42

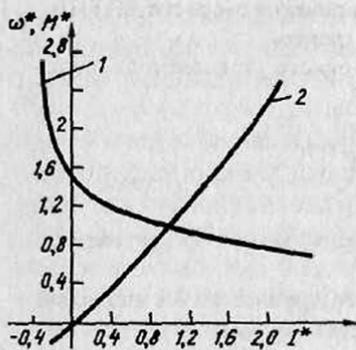


Рис. 4.43

Электромеханическая и механическая характеристики ДПТСМ выражаются соответственно формулами (4.60) и (4.61), в которых магнитный поток  $\Phi$  также есть функция тока якоря.

Для практических расчетов используются универсальные характеристики ДПТСМ, которые приводятся в справочной литературе и показаны на рис. 4.43. Они представляют собой зависимости 1 и 2 соответственно относительных скорости  $\omega^* = \omega / \omega_{ном}$  и момента  $M^* = M / M_{ном}$  от относительного тока якоря  $I^* = I / I_{ном}$ , кото-

рые во многом схожи с универсальными характеристиками ДППВ, но имеют одно существенное отличие: определенную скорость идеального холостого хода.

Поскольку характеристики ДПТСМ располагаются и во втором квадранте, это означает, что он может работать во всех возможных энергетических режимах.

Регулирование координат ЭП с этим типом ДПТСМ может осуществляться изменением напряжения, магнитного потока и сопротивления добавочного резистора в цепи якоря. ДПТСМ обеспечивает также следующие режимы торможения ЭП: динамическое с независимым возбуждением и самовозбуждением, противозвключением и рекуперативное.

Отметим, что наличие двух обмоток возбуждения существенно увеличивает расход материалов на изготовление двигателя и тем самым его массу, габаритные размеры и стоимость. По этой причине этот тип двигателя в настоящее время применяется только в тех случаях, когда его использование диктуется какими-либо специфическими требованиями и подтверждается технико-экономическими расчетами.

### Контрольные вопросы

1. Какие серии двигателей постоянного тока выпускаются электротехнической промышленностью?
2. Опишите основную схему включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
3. Какие допущения принимаются при выводе формул для характеристик двигателя постоянного тока?
4. Назовите виды и соответствующие признаки энергетических режимов двигателя.
5. Назовите основные способы регулирования координат ЭП с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.

6. Охарактеризуйте основные способы регулирования скорости ДПТНВ.
7. Что такое пусковая диаграмма и как она строится?
8. Опишите схему и принцип действия тиристорного управляемого выпрямителя.
9. Каковы достоинства и недостатки системы Г – Д?
10. Каковы достоинства и недостатки системы ТП – Д?
11. В чем цель и сущность формирования статических и динамических характеристик ЭП?
12. В каких случаях целесообразно использовать схему с шунтированием якоря двигателя с независимым возбуждением?
13. Каковы схема и характеристики системы «источник тока – двигатель»?
14. В чем сущность импульсного регулирования координат ЭП?
15. Что такое универсальные характеристики двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения?
16. В чем особенности схемы включения и характеристик ДПТПВ?
17. Назовите способы регулирования скорости ДПТПВ.
18. Назовите способы торможения ДПТПВ.
19. В чем особенности схемы включения и характеристик ДПТСВ?

## Глава 5. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

ЭП с трехфазным асинхронным двигателем (АД) является самым массовым видом привода в промышленности, коммунальном и сельском хозяйстве. Такое положение определяется простотой изготовления и эксплуатации АД, меньшими по сравнению с ДПТ массой, габаритными размерами и стоимостью, а также высокой надежностью в работе.

В основную общепромышленную серию 4А входят АД с мощностью от 0,06 до 400 кВт и высотами осей вращения от 50 до 355 мм, которые выпускаются самых различных модификаций и конструктивных исполнений: с повышенными пусковым моментом и скольжением; с фазным ротором; встраиваемые; малошумные; со встроенной температурной защитой; с электромагнитным тормозом; с подшипниками скольжения; химостойкие. АД различаются также по климатическому исполнению и категории размещения. Для комплектации ЭП большой мощности выпускаются АД серий АН-2 (мощностью до 2000 кВт), АВ (мощностью до 8000 кВт), ДАЗО (мощностью до 1250 кВт) и ряд других.

Для ЭП крановых механизмов производятся специализированные АД серий МТФ (с фазным ротором) и МТКФ (с короткозамкнутым ротором), а для рабочих машин и механизмов металлургического производства – АД серий МТН (с фазным ротором) и

МТКН (с короткозамкнутым ротором). В составе этих серий выпускаются и многоскоростные АД. Двигатели указанных серий отличаются повышенной механической прочностью, большими пусковыми моментами при сравнительно небольших пусковых токах, хорошими динамическими показателями. Крановые и металлургические АД новой серии 4МТ отличаются улучшенными технико-экономическими показателями работы, расширенной шкалой мощностей, более высоким уровнем стандартизации.

Двигатели серии АИ с мощностью от 0,75 до 160 кВт имеют унифицированные по международным стандартам параметры.

Кроме того, электротехническая промышленность выпускает АД серий В и ВР для работы во взрывоопасных и пожароопасных средах.

Основной областью применения АД вплоть до недавнего времени являлся нерегулируемый ЭП. В последние годы в связи с разработкой и серийным выпуском электротехнической промышленностью тиристорных преобразователей частоты и напряжения стали создаваться регулируемые асинхронные ЭП с характеристиками, не уступающими по своим показателям ЭП постоянного тока. Применение таких ЭП в силу преимуществ АД отражает прогрессивную тенденцию развития автоматизированных ЭП.

### 5.1. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ, СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Трехфазный АД имеет обмотку статора, подключаемую к трехфазной сети переменного тока с напряжением  $U_1$  и частотой  $f_1$ , и обмотку ротора, которая может быть выполнена в двух вариантах.

Первый вариант предусматривает выполнение обычной трехфазной обмотки из проводников с выводами на три контактных кольца. Такая конструкция соответствует АД с фазным ротором (рис. 5.1, а),

она позволяет включать в роторную цепь различные электротехнические элементы, например резисторы для регулирования скорости, тока и момента ЭП, и создавать специальные схемы включения АД.

Второй вариант – это выполнение обмотки заливкой алюминия в пазы ротора, в результате чего образуется конструкция, известная под названием «беличья клетка». Схема АД с та-

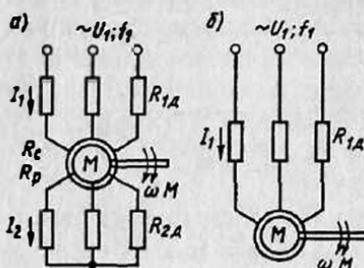


Рис. 5.1

кой обмоткой, не имеющей выводов и получившей название короткозамкнутой, представлена на рис. 5.1, б.

Для получения выражений электромеханической и механической характеристик АД используется его схема замещения, на которой цепи статора и ротора представлены своими активными и индуктивными сопротивлениями. Особенность схемы замещения АД состоит в том, что в ней ток, ЭДС и параметры цепи ротора пересчитаны (приведены) к цепи статора, что и позволяет изобразить эти две цепи на схеме соединенными электрически, хотя в действительности связь между ними осуществляется через электромагнитное поле. Приведение осуществляется с помощью коэффициента трансформации АД по ЭДС:

$$\kappa = E_1/E_2 \approx 0,95U_{\text{ф.ном}}/E_{2\kappa}, \quad (5.1)$$

где  $E_1$  и  $E_{2\kappa}$  – фазные ЭДС статора и ротора при неподвижном роторе;  $U_{\text{ф.ном}}$  – фазное номинальное напряжение сети.

Расчетные формулы приведения имеют вид

$$E'_2 = E_2\kappa = E_1; I'_2 = I_2/\kappa; R'_2 = R_2\kappa^2; x'_2 = x_2\kappa^2, \quad (5.2)$$

где штрихом обозначены приведенные значения.

В теории электрических машин разработаны и применяются две основные схемы замещения АД – более точная Т-образная и упрощенная П-образная. На рис. 5.2 представлена П-образная схема замещения, которая в дальнейшем и используется при выводе формул для характеристик АД. На рис. 5.1 и 5.2 приняты следующие обозначения:  $U_1, \dot{U}$  – соответственно действующее значение линейного и комплексное фазного напряжения сети;  $\dot{I}_1, \dot{I}'_2, \dot{I}'_2$  – соответственно комплексные фазные токи статора, намагничивания и приведенный ток ротора;  $x_1, x'_2$  – соответственно индуктивные сопротивления от потоков рассеяния фазы обмотки статора и приведенное фазы ротора;  $x_\mu$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания;  $R_c, R_{1\mu}, R_1 = R_c + R_{1\mu}$  – соответственно активные фазные сопротивления обмотки статора, добавочного резистора и суммарное сопротивление фазы статора;  $R_p, R_{2\mu}, R_2 = R_p + R_{2\mu}$  – соответственно активные приведенные к обмотке статора фазные сопротивления обмотки ротора, добавочного резистора и суммарное сопротивление фазы ротора;  $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$  – скольжение АД;  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$  – угловая скорость магнит-

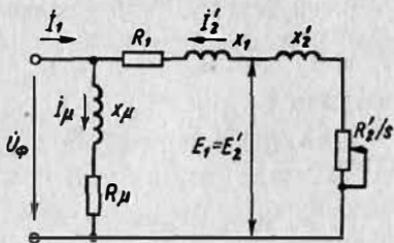


Рис. 5.2

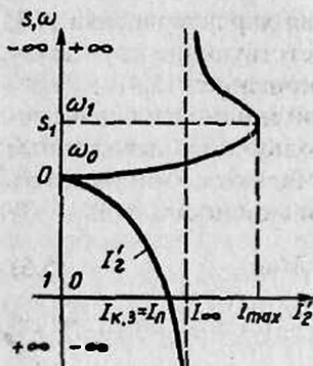


Рис. 5.3

ного поля АД (скорость идеального холостого хода);  $f_1$  – частота питающего напряжения;  $p$  – число пар полюсов АД.

Как видно из рис.5.2, ЭДС статора равна приведенной ЭДС ротора, а ток намагничивания  $I_m$ , определяющий магнитный поток АД, протекает под действием  $U_\phi$  по отдельной цепи, состоящей из сопротивлений контура намагничивания  $x_m$  и  $R_m$ , и представляет собой векторную сумму токов статора и приведенного роторного, т. е.  $I_\mu = I_1 + I_2'$ .

**Электромеханическая характеристика**  $I_2'(s)$  АД описывается выражением, получаемым непосредственно из анализа рис. 5.2:

$$I_2' = U_\phi / \sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + x_k^2}, \quad (5.3)$$

где  $x_k = x_1 + x_2'$  – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания.

В отличие от двигателя постоянного тока электромеханическая характеристика АД представляется в виде зависимости тока ротора от скольжения, а не от скорости  $\omega$ , что является особенностью этих двигателей. Поэтому выражение для характеристики имеет компактную форму записи и более удобно для анализа и вычислений, а переход к зависимости вида  $\omega(I_2')$  осуществляется с помощью формулы

$$\omega = \omega_0(1 - s). \quad (5.4)$$

Для построения электромеханической характеристики АД проанализируем характерные точки этой зависимости и ее асимптоты, придавая скольжению  $s$  и скорости  $\omega$  различные значения в пределах  $\pm\infty$ :

$s = 0, \omega = \omega_0, I_2' = 0$  – точка идеального холостого хода;

$s = 1, \omega = 0, I_2' = I_{к,с} = U_\phi / \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + x_k^2}$  – точка короткого замыкания;

$s_1 = -R_2'/R_1, \omega_1 = \omega_0(1 + s_1), I_2' = I_{\max} = U_\phi/x_k$  – точка максимального значения тока ротора, лежащая в области отрицательных скольжений;

$s \rightarrow \pm\infty, \omega \rightarrow \pm\infty, I_2' \rightarrow I_\infty = U_\phi / \sqrt{R_1^2 + x_k^2}$  – асимптота тока ротора при бесконечно большом увеличении скольжения и скорости.

На рис. 5.3 показана электромеханическая характеристика АД, причем по вертикальной оси указаны соответствующие друг другу скорость и скольжение АД, связанные соотношением (5.4).

**Механическая характеристика АД.** Потери мощности в цепи ротора, которые часто называют потерями скольжения, выраженные через механические координаты АД, представляют собой разность электромагнитной и полезной механической мощности, т. е.

$$\Delta P_2 = P_{\text{эм}} - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega s. \quad (5.5)$$

Потери мощности в роторе, выраженные через электрические величины, определяются как

$$\Delta P_2 = 3 I_2'^2 R_2'. \quad (5.6)$$

Приравняв (5.5) и (5.6), получим

$$M = 3 I_2'^2 R_2' / (\omega_0 s). \quad (5.7)$$

Подставив в (5.7) значение тока  $I_2'$  из (5.3), получим

$$M = 3U_{\text{ф}}^2 R_2' / [\omega_0 s ((R_1 + R_2'/s)^2 + x_{\text{к}}^2)]. \quad (5.8)$$

Исследовав полученную зависимость  $M(s)$  на экстремум, т. е. взяв производную  $dM/ds$  и приравняв ее нулю, обнаружим наличие двух экстремальных точек момента и скольжения:

$$M_{\text{к}} = 3U_{\text{ф}}^2 / [2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_{\text{к}}^2})]; \quad (5.9)$$

$$s_{\text{к}} = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + x_{\text{к}}^2}, \quad (5.10)$$

причем знак «плюс» здесь относится к области скольжения  $s > 0$ , а знак «минус» – к области  $s < 0$ . Значения момента  $M_{\text{к}}$  и скольжения  $s_{\text{к}}$  АД, соответствующие экстремальным точкам, получили название критических.

Если разделить выражение (5.8) на (5.9) и выполнить несложные преобразования, то можно получить другую, более компактную и удобную форму записи для построения механической характеристики

$$M = 2M_{\text{к}} (1 + as_{\text{к}}) / (s_{\text{к}}/s + s/s_{\text{к}} + 2as_{\text{к}}), \quad (5.11)$$

где  $a = R_1/R_2'$ .

Характерные точки механической характеристики следующие:

$s = 0, \omega = \omega_0, M = 0$  – точка идеального холостого хода;

$s = 1, \omega = 0, M = M_{\text{кз}} = M_{\text{н}}$  – точка короткого замыкания;

$s = s_{к.д}$ ,  $M = M_{к.д}$ ;  $s = -s_{к.г}$ ,  $M = -M_{к.г}$  – критические точки соответственно в двигательном и генераторном режимах;

$s \rightarrow \pm\infty$ ,  $\omega \rightarrow \pm\infty$ ,  $M \rightarrow 0$  – асимптота механической характеристики, которой является ось скорости.

На рис. 5.4 приведена механическая характеристика АД. Отметим, что она соответствует определенному чередованию фаз питающего напряжения сети  $U_1$  на зажимах статора АД. При изменении порядка чередования двух фаз АД будет иметь аналогичную механическую характеристику, расположенную симметрично относительно начала координат.

В некоторых случаях при построении механической характеристики используют приближенные формулы. Если пренебречь активным сопротивлением статора, т.е. считать  $a = 0$ , выражения (5.11), (5.9) и (5.10) примут соответственно вид

$$M = 2M_{к} / (s/s_{к} + s_{к}/s); \quad (5.12)$$

$$M_{к} = 3U_{\phi}^2 / (2\omega_0 x_{к}); \quad (5.13)$$

$$s_{к} = R_2' / x_{к}. \quad (5.14)$$

Если в (5.12) вместо текущих значений момента и скольжения подставить их номинальные значения  $M_{ном}$  и  $s_{ном}$  и обозначить кратность максимального момента  $M_{к} / M_{ном}$  через  $\lambda_{м}$ , то получим формулу, связывающую критическое и номинальное скольжения,

$$s_{к} = s_{ном} \left( \lambda_{м} \pm \sqrt{\lambda_{м}^2 - 1} \right). \quad (5.15)$$

Эта формула может использоваться для определения  $s_{к}$  по каталожным (паспортным) данным АД. Для серии 4А кратность  $\lambda_{м}$ , определяющая перегрузочную способность двигателей, лежит в пределах 1,8...2,6, соответственно критическое скольжение  $s_{к}$  превышает номинальное  $s_{ном}$  (при знаке «+» в (5.15)) примерно в 3...4 раза.

Дальнейшее упрощение (5.12) возможно для области малых скольжений, в которой можно пренебречь отношением  $s/s_{к}$ . В этом случае выражение (5.12) примет вид

$$M = 2M_{к} s / s_{к}. \quad (5.16)$$

Формула (5.16) описывает так называемый рабочий, близкий к линей-

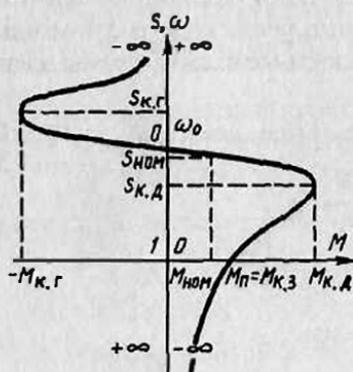


Рис. 5.4

ному участок характеристики двигателя, на котором находится точка номинального режима с координатами  $M_{\text{ном}}, \omega_{\text{ном}}, s_{\text{ном}}$ .

АД может работать во всех возможных энергетических режимах, которые определяются значением и знаком скольжения, а именно:

$s = 0, \omega = \omega_0$  – режим идеального холостого хода;

$s = 1, \omega = 0$  – режим короткого замыкания;

$0 < s < 1, 0 < \omega < \omega_0$  – двигательный режим;

$s < 0, \omega > \omega_0$  – генераторный режим при работе АД параллельно с сетью (рекуперативное торможение);

$s > 1, \omega < 0$  – генераторный режим при работе АД последовательно с сетью (торможение противовключением).

Кроме того, АД может работать в генераторном режиме независимо от сети переменного тока, который называется режимом динамического торможения. В этом режиме обмотка статора АД, отключенная от сети переменного тока, подключена к источнику постоянного тока, а цепь ротора замкнута накоротко или на добавочные резисторы (см. разд. 5.10).

Полученные формулы для электромеханической и механической характеристик позволяют назвать возможные способы регулирования координат АД, которое, напомним, всегда связано с получением искусственных характеристик двигателя. Из (5.3) следует, что регулирование (ограничение) токов в роторе и статоре в переходных режимах может быть обеспечено изменением подводимого к статору АД напряжения, а также с помощью добавочных резисторов в цепях статора и ротора.

Формула (5.8) определяет возможные способы получения искусственных механических характеристик, требуемых при регулировании момента и скорости АД, а именно: изменение уровня и частоты подводимого к двигателю напряжения; включение в цепи статора и ротора добавочных активных и реактивных резисторов; изменение числа пар полюсов магнитного поля АД. Применяются и другие способы регулирования координат, реализуемые с помощью специальных схем включения АД, – каскадные схемы, схемы электрического вала.

Задача 5.1\*. АД типа МТН-312-6 имеет следующие данные:  $P_{\text{ном}} = 17,5$  кВт,  $n_{\text{ном}} = 945$  об/мин;  $U_{\text{ном}} = 380$  В;  $f_1 = 50$  Гц;  $I_{\text{ном}} = 43$  А;  $R_c = 0,34$  Ом;  $x_1 = 0,43$  Ом;  $R_p = 0,12$  Ом;  $x_2 = 0,25$  Ом;  $\kappa = 2,66$ ;  $\lambda_m = M_k / M_{\text{ном}} = 2,5$ .

Рассчитать и построить естественные электромеханическую и механическую характеристики двигателя.

Определим скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 3 = 104,8 \text{ рад / с.}$$

Рассчитаем приведенные значения сопротивлений обмотки ротора и индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$x_2' = x_2 \kappa^2 = 0,25 \cdot 7,08 = 1,8 \text{ Ом}; \quad R_2' = R_2 \kappa^2 = 0,12 \cdot 7,08 = 0,89 \text{ Ом};$$

$$x_k = x_1 + x_2' = 0,43 + 1,8 = 2,23 \text{ Ом}.$$

Определим характерные точки характеристики  $I_2'(s)$ :

$$I_{к.з} = I_{пуск} = U_{1\phi} / \sqrt{(R_c + R_2')^2 + x_k^2} = 220 / \sqrt{(0,34 + 0,89)^2 + 2,23^2} = 87,1 \text{ А};$$

$$s_1 = -R_p' / R_c = -0,89 / 0,34 = -2,6; \quad I_{max} = U_{1\phi} / x_k = 220 / 2,23 = 99,5 \text{ А};$$

$$I_{\infty} = U_{1\phi} / \sqrt{R_c^2 + x_k^2} = 220 / \sqrt{0,34^2 + 2,23^2} = 98,4 \text{ А}.$$

Для расчета электромеханической характеристики  $I_2'(s)$  в формулу (5.3) подставим найденные значения параметров:

$$I_2' = U_{1\phi} / \sqrt{(R_c + R_2'/s)^2 + x_k^2} = 220 / \sqrt{(0,34 + 0,89/s)^2 + 2,23^2}.$$

Для расчета механической характеристики определим сначала координаты точек номинального режима и критического момента:

$$\omega_{ном} = \pi n_{ном} / 30 = 3,14 \cdot 945 / 30 = 99 \text{ рад/с};$$

$$s_{ном} = (\omega_0 - \omega_{ном}) / \dot{\omega}_0 = (104,8 - 99) / 104,8 = 0,07;$$

$$M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном} = 17500 / 99 = 177 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_k = \lambda_m M_{ном} = 2,5 \cdot 177 = 442 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$s_k = R_p' / \sqrt{R_c^2 + x_k^2} = 0,89 / \sqrt{0,34^2 + 2,23^2} = 0,4; \quad a = R_c / R_2' = 0,34 / 0,89 = 0,34.$$

Подставив полученные значения в (5.11), получим расчетную формулу:

$$M = 2M_k(1 + as_k) / (s/s_k + s_k/s + 2as_k) = 1018 / (s/0,4 + 0,4/s + 0,3).$$

Задаваясь скольжением  $s$ , рассчитаем значения тока и момента:

$s$ .....	3	2,6	0,5	0	0,07	0,4	1	1,5
$\omega$ , рад/с.....	419,2	337	157,2	104,8	99	62,9	0	- 52,4
$I_2'$ , А.....	99,4	99,5	83,4	0	16,6	64,7	87,1	91,8
$M$ , Н\cdotм ....	- 120	- 160	- 582	0	177	442	316	234

Используя полученные данные, построим естественные электромеханическую  $l$  и механическую  $2$  характеристики (рис. 5.5).

**Задача 5.2\*.** АД с короткозамкнутым ротором типа 4А160S имеет следующие паспортные данные:  $P_{ном} = 15 \text{ кВт}$ ;  $n_{ном} = 1465 \text{ об/мин}$ ;  $I_{1ном} = 29,3 \text{ А}$ ;  $\lambda_m = M_k / M_{ном} = 2,3$ ;  $\lambda_1 = I_{1п} / I_{1ном} = 7$ ;  $p = 2$ ;  $f_{1ном} = 50 \text{ Гц}$ ;  $U_{1ном} = 380 \text{ В}$ . Рассчитать естественную механическую характеристику АД.

Определим номинальную угловую скорость:

$$\omega_{ном} = 2\pi n_{ном} / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1465 / 60 = 153 \text{ рад/с}.$$

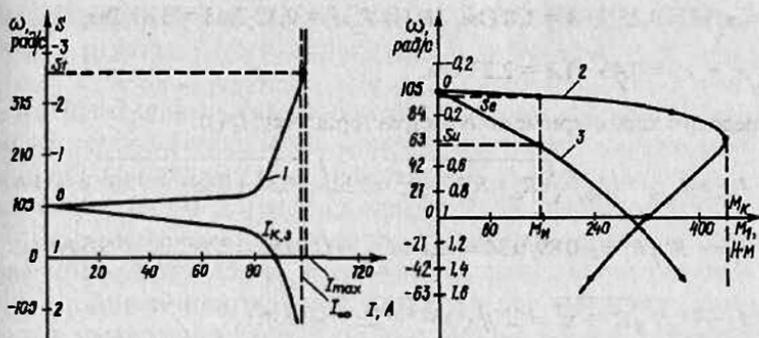


Рис. 5.5

Определим скорость идеального холостого хода, номинальные момент и скольжение:

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2 = 157 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 15\,000 / 153 = 98 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$s_{\text{ном}} = (\omega_0 - \omega_{\text{ном}}) / \omega_0 = (157 - 153) / 157 = 0,025.$$

Полученных данных достаточно для приближенного построения рабочего участка механической характеристики АД по двум точкам – номинальной ( $\omega_{\text{ном}}$ ,  $M_{\text{ном}}$ ) и холостого хода ( $\omega_0$ , 0). Для получения полной механической характеристики продолжим расчет.

Определим критический момент АД:

$$M_k = \lambda_m M_{\text{ном}} = 2,3 \cdot 98 = 225 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

и по формуле (5.15) критическое скольжение АД (приняв знак «+»):

$$s_k = s_{\text{ном}} \left( \lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right) = 0,025 \left( 2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1} \right) = 0,11.$$

Подставив найденные значения в формулу (5.12), получим

$$M = 2M_k / (s/s_k + s_k/s) = 2 \cdot 225 / (s/0,11 + 0,11/s).$$

Задаваясь рядом значений  $s$  от 1 до 0, определим соответствующие значения момента:

$s$ .....	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,11	0
$\omega$ , рад/с.....	0	31,4	62,8	94,2	126	151	157
$M$ , Н·м.....	48,9	60,7	79,8	115	190	225	0

По полученным данным построим искомые зависимости  $M(s)$  и  $M(\omega)$  (кривая 2 на рис. 5.5).

## 5.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ РЕЗИСТОРОВ

Данный способ регулирования координат, называемый часто остататным, осуществляется введением добавочных активных резисторов в статорные или роторные цепи АД (см. рис. 5.1). Он привлекателен простотой своей реализации, но имеет в то же время невысокие показатели качества регулирования и экономичности.

Включение добавочных резисторов  $R_{1д}$  в цепь статора применяется главным образом для регулирования (ограничения) в переходных процессах тока и момента АД с короткозамкнутым ротором. Как следует из формулы (5.3), включение резистора в цепь статора ведет при данной скорости (скольжении) к снижению токов статора и ротора. Другими словами, все искусственные электромеханические характеристики располагаются в первом квадранте ниже и левее естественной. С учетом того, что скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  при включении  $R_{1д}$  не изменяется, получаемые искусственные электромеханические характеристики можно представить семейством кривых 2...4, которые расположены ниже естественной характеристики 1, построенной при  $R_{1д} = 0$ , причем большему значению  $R_{1д}$  соответствует больший наклон искусственных характеристик (рис. 5.6, а). Практическая ценность этих характеристик состоит в обеспечении возможности ограничения токов АД при пуске.

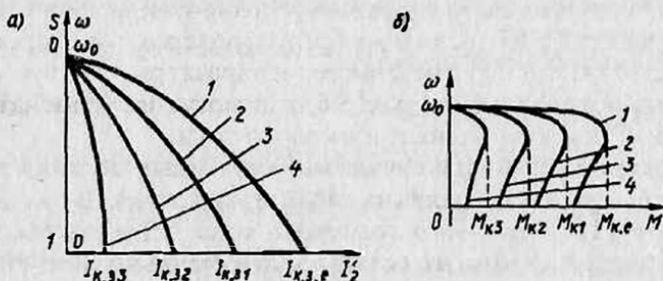


Рис. 5.6

Для получения искусственных механических характеристик проанализируем влияние  $R_{1д}$  на координаты их характерных точек.

Скорость холостого хода  $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$  не изменяется при  $R_{1д} = \text{var}$ , т.е. все искусственные характеристики проходят через эту точку на оси скорости (скольжения).

Координаты точки экстремума  $M_k$  и  $s_k$  изменяются при варьировании  $R_{1д}$ , а именно: в соответствии с (5.9) и (5.10) при увеличении  $R_{1д}$  критический момент и критическое скольжение уменьшаются. Уменьшается и пусковой момент, который определяется формулой (5.8) при  $s = 1$ . Проведенный анализ позволяет представить искус-

ственные механические характеристики 2...4 АД при  $R_{1д} = \text{var}$  в виде, показанном на рис. 5.6, б. Такие характеристики могут использоваться при необходимости для снижения в переходных процессах момента АД, в том числе и пускового. В то же время эти искусственные характеристики мало пригодны для регулирования скорости АД, так как они обеспечивают небольшой диапазон ее изменения; по мере увеличения  $R_{1д}$  жесткость характеристик и перегрузочная способность АД, характеризуемая критическим моментом, снижаются; способ имеет и низкую экономичность.

В силу этих недостатков регулирование скорости АД с помощью активных резисторов в цепи его статора применяется редко. Этот способ обычно используется для ограничения токов и моментов АД с короткозамкнутым ротором в различных переходных процессах — при пуске, реверсе и торможении. Например, такая схема применяется в ЭП лифтов с двухскоростными АД. В таких ЭП при переходе с высокой скорости на пониженную в цепь низкоскоростной обмотки статора вводятся добавочные резисторы, которые обеспечивают ограничение тока и момента АД. Отметим, что в некоторых ЭП ограничение тока и момента осуществляется включением  $R_{1д}$  в одну фазу (так называемые несимметричные схемы), что позволяет получить эффект уменьшения тока и момента при меньшем числе резисторов.

**Включение добавочных резисторов  $R_{2д}$  в цепь ротора** (см. схему рис. 5.1, а) применяется как с целью регулирования тока и момента АД с фазным ротором, так и для регулирования его скорости.

Искусственные электромеханические характеристики при  $R_{2д} = \text{var}$  имеют вид, показанный на рис. 5.6, а, и могут использоваться для регулирования (ограничения) пускового тока.

Для построения в этом случае искусственных механических характеристик проводят анализ их характерных точек. В соответствии с (5.9) скорость идеального холостого хода АД и его максимальный (критический) момент остаются неизменными при регулировании  $R_{2д}$ , а критическое скольжение, как это следует из (5.10), изменяется пропорционально сопротивлению этого резистора.

Выполненный анализ позволяет построить естественную 1 ( $R_{2д} = 0$ ) и искусственные 2 и 3 ( $R_{2д3} > R_{2д2}$ ) характеристики (рис. 5.7) и сделать вывод о том, что за счет изменения  $R_{2д}$  можно повышать пусковой момент АД вплоть до критического значения  $M_k$  при одновременном снижении пускового тока. Это позволяет сохранить перегрузочную способность двигателя, что весьма важно при регулировании его скорости.

Рассматриваемый способ имеет следующие показатели: небольшой диапазон регулирования скорости из-за снижения жесткости характеристик и роста потерь энергии по мере его увеличения; плав-

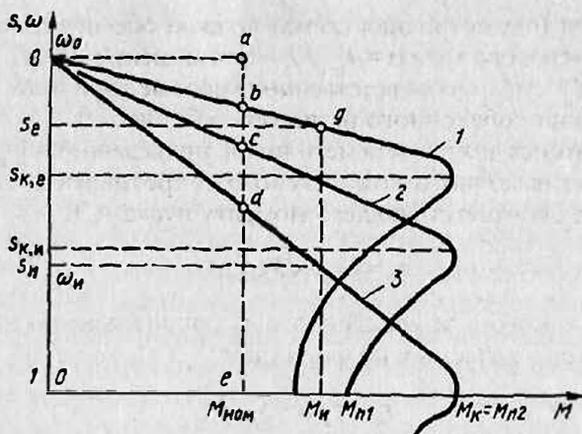


Рис. 5.7

ность регулирования скорости, изменяющаяся только вниз от основной, определяется плавностью изменения добавочного резистора  $R_{2н}$ ; небольшие затраты, связанные с созданием данной системы ЭП, так как для регулирования обычно используются простые и дешевые ящики металлических резисторов. В то же время эксплуатационные затраты оказываются значительными, поскольку велики потери энергии в АД.

С увеличением скольжения  $s$  (5.5) возрастают потери в роторной цепи, т. е. реализация большого диапазона регулирования скорости приводит к значительным потерям энергии и снижению КПД ЭП, следовательно данный способ применяется при небольшом требуемом диапазоне регулирования или кратковременной работе двигателя на пониженных скоростях, например в ЭП подъемно-транспортных машин и механизмов.

### 5.3. РАСЧЕТ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Задача по расчету резисторов в цепях статора и ротора обычно формулируется следующим образом: известны паспортные данные двигателя; требуется рассчитать сопротивление добавочных резисторов в цепях ротора или статора, при включении которых искусственные характеристики пройдут соответственно через точки с координатами  $(\omega_n, I_n)$  или  $(\omega_n, M_n)$ . Расположение характеристик обычно задается по соображениям регулирования скорости или получения требуемых (допустимых) значений пусковых тока или момента АД.

**Расчет резисторов в цепи статора.** Рассмотрим наиболее распространенную задачу, когда включение добавочного резистора во все три

фазы статора (симметричная схема) должно обеспечить заданную кратность пускового тока  $\alpha = I_{1н.н}/I_{1н.е}$  или момента  $\mu = M_{п.н}/M_{п.е}$ , где  $I_{1н.н}$ ,  $I_{1н.е}$  и  $M_{п.н}$ ,  $M_{п.е}$  — соответственно пусковые токи и моменты АД при включении добавочного резистора и без него.

Воспользуемся для расчета методикой, приведенной в [3], для чего введем понятия полного комплексного сопротивления короткого замыкания  $z_k$ , соответствующего моменту пуска АД:

$$z_k = U_{1\phi} / \sqrt{3} I_{1н.е}, \quad (5.17)$$

а также активного  $r_k$  и реактивного  $x_k$  сопротивлений короткого замыкания, определяемых по формулам

$$r_k = z_k \cos \varphi_n, \quad (5.18)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}, \quad (5.19)$$

где  $\cos \varphi_n$  — коэффициент мощности АД в момент его пуска.

Тогда для получения заданных кратностей пусковых тока  $\alpha$  или момента  $\mu$  требуемое сопротивление добавочного резистора определим по формулам

$$R_{1д} = \sqrt{(z_k/\alpha)^2 - x_k^2} - r_k; \quad (5.20)$$

$$R_{1д} = \sqrt{(z_k/\mu)^2 - x_k^2} - r_k. \quad (5.21)$$

Основная трудность при использовании формул (5.18) ... (5.21) состоит в определении  $\cos \varphi_n = \cos \varphi_{кз}$ , значение которого обычно не приводится в справочниках и каталогах. На рис. 5.8 приведены усредненные зависимости коэффициента мощности асинхронных двигателей от их номинальной мощности в режиме короткого замыкания (пуска), рассчитанные по паспортным данным двигателей серий 4А (кривая 2), и МТК (кривая 1) для различных скоростей вращения. Приблизительно для серии двигателей 4А с короткозамкнутым ротором можно принять  $\cos \varphi_n = 0,3 \dots 0,5$ , а для АД серий МТФ и МТН  $\cos \varphi_n = 0,6 \dots 0,7$ .

В [3] приведен также метод расчета добавочного резистора, включаемого в одну фазу статора (несимметричная схема), с целью получения заданных пусковых тока и момента.

**Расчет резисторов в цепи ротора.** Обычно требуется определить

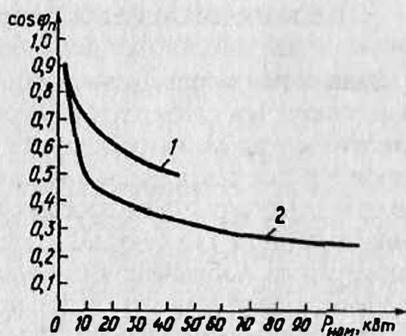


Рис. 5.8

сопротивление дополнительного резистора  $R_{2н}$ , при включении которого АД будет иметь заданную искусственную характеристику или же она будет проходить через заданную точку с координатами  $(\omega_n, M_n)$ . При этом предполагается, что естественная механическая характеристика АД известна (рассчитана или снята экспериментально), а требуемая искусственная характеристика задана по условиям пуска или регулирования скорости.

Расчет сопротивления добавочного резистора  $R_{2н}$  может быть выполнен несколькими способами в зависимости от формы задания требуемой искусственной механической характеристики.

Если искусственная характеристика задана полностью и определена точка критического момента (например, характеристика 2 на рис. 5.7), то в этом случае расчет основывается на формуле (5.10), с помощью которой находится отношение критических скольжений АД на естественной 1 и искусственной 2 характеристиках:

$$s_{к.е}/s_{к.н} = R'_p / (R'_p + R_{2н1}') = R_p / (R_p + R_{2н1}), \quad (5.22)$$

где  $R_p$  – сопротивление фазы обмотки ротора АД.

Из (5.22) определим искомое значение

$$R_{2н1} = R_p (s_{к.н}/s_{к.е} - 1). \quad (5.23)$$

Формула (5.23) справедлива не только для критического момента  $M_{к'}$ , но и для любого фиксированного момента  $M_n$ . Таким образом, если задана некоторая точка  $f$  искусственной характеристики 3 (см. рис. 5.7) с координатами  $M_n, s_n$ , то искомое сопротивление резистора можно найти по формуле

$$R_{2н2} = R_p (s_n/s_e - 1), \quad (5.24)$$

где  $s_e$  – скольжение АД на естественной характеристике 1, соответствующее моменту  $M_n$ .

Отметим, что значение сопротивления обмотки ротора можно найти приближенно по следующей формуле с использованием паспортных данных АД:

$$R_p = E_{2к} s_{ном} / \left( \sqrt{3} I_{2ном} \right). \quad (5.25)$$

Если искусственная характеристика задана своей рабочей частью, то для расчета резисторов можно использовать метод отрезков, который подробно рассматривался в гл. 4 применительно к ДПТНВ. На рис. 5.7 выполнено такое построение, для чего проведена вертикальная линия, соответствующая номинальному моменту  $M_{ном}$ , и отмечены характерные точки  $a, b, c, d, e$ . Тогда сопротивление искомого резистора для получения характеристики 2

$$R_{2д1} = R_{ном} bc / ae, \quad (5.26)$$

где  $R_{ном} = E_{2к} / (\sqrt{3} I_{2ном})$  – номинальное сопротивление АД;  $E_{2к}$  – ЭДС ротора при  $s = 1$ ;  $I_{2ном}$  – номинальный ток ротора.

С помощью метода отрезков и рис. 5.7 при необходимости по естественной характеристике  $I$  можно найти и сопротивление фазы обмотки ротора

$$R_p = R_{2ном} ab / ae. \quad (5.27)$$

Типовой задачей для ЭП с АД с фазным ротором является расчет резисторов в цепи ротора, обеспечивающих заданную пусковую диаграмму двигателя. Напомним, что пусковая диаграмма представляет собой совокупность нескольких искусственных механических характеристик АД, которые используются при его пуске. Пусковая диаграмма АД обычно строится по аналогии с ДПТНВ (см. разд. 4.5, рис. 4.7) в предположении, что рабочий участок механических характеристик АД близок к линейному. При построении пусковой диаграммы АД момент  $M_1$  обычно принимается не более  $(0,8 \dots 0,9) M_c$ , а момент  $M_2$  должен составлять  $(1,1 \dots 1,2) M_c$ . Число характеристик (ступеней) пусковой диаграммы  $m$  и значения моментов  $M_1$  и  $M_2$  связаны между собой следующим соотношением:

$$m = \lg(1/s_{ном} M_1) / \lg(M_1/M_2). \quad (5.28)$$

Расчет пусковых резисторов, обеспечивающих требуемую пусковую диаграмму, производится с помощью формул (5.24) или (5.26).

**Задача 5.3\***. Для АД типа 4А160S (см. задачу 5.2) рассчитать сопротивление добавочного резистора  $R_{1д}$ , включение которого в три фазы двигателя уменьшит пусковой ток в два раза ( $\alpha = 0,5$ ).

Определим пусковой ток АД при отсутствии резисторов в цепи статора:

$$I_{п.е} = \lambda_1 I_{1ном} = 7 \cdot 29,3 = 205 \text{ А.}$$

Определим по формуле (5.17) полное сопротивление короткого замыкания:

$$z_k = U_{1ном} / (\sqrt{3} I_{1ном}) = 380 / (1,73 \cdot 205) = 1,08 \text{ Ом.}$$

Принимая по рис. 5.8  $\cos \varphi_n = 0,4$ , определим по (5.18) и (5.19)

$$r_k = z_k \cos \varphi_n = 1,08 \cdot 0,4 = 0,43 \text{ Ом;}$$

$$x_k = \sqrt{(z_k^2 - r_k^2)} = \sqrt{1,08^2 - 0,43^2} = 1 \text{ Ом.}$$

Теперь найдем по (5.20) искомое сопротивление:

$$R_{1д} = \sqrt{(z_k/\alpha)^2 - x_k^2} - r_k = \sqrt{(1,08/0,5)^2 - 1^2} - 0,43 = 1,5 \text{ Ом.}$$

**Задача 5.4\*.** Для АД типа МТН-312-6 (см. задачу 5.1) рассчитать добавочное сопротивление  $R_{2д}$ , при включении которого в цепь ротора механическая характеристика пройдет через точку с координатами  $\omega_n = 0,6 \omega_{ном}$ ,  $M_n = 0,9 M_{ном}$ . Рассчитать и построить эту искусственную характеристику.

Рассчитаем координаты заданной точки, используя координаты номинальной точки (см. задачу 5.1):

$$\omega_n = 0,6 \omega_{ном} = 0,6 \cdot 99 = 59,4 \text{ рад/с};$$

$$s_n = (\omega_0 - \omega_n) / \omega_0 = (104,8 - 59,4) / 104,8 = 0,43;$$

$$M_n = 0,9 M_{ном} = 0,9 \cdot 177 = 159 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

и нанесем ее на плоскость механических характеристик (см. рис. 5.5).

Для момента  $M_n = 159 \text{ Н}\cdot\text{м}$  определим скольжение  $s_c$  при работе АД на естественной характеристике 2, которое оказывается равным 0,06.

По формуле (5.24) определим требуемое добавочное сопротивление:

$$R'_{2д} = R'_p (s_n / s_c - 1) = 0,89 (0,43 / 0,06 - 1) = 5,5 \text{ Ом.}$$

Критическое скольжение при включении добавочного сопротивления и работе АД на искусственной характеристике 3

$$s_{к.и} = (R'_{2д} + R'_p) / \sqrt{R_c^2 + x_c^2} = (0,89 + 5,5) / \sqrt{0,34^2 + 2,23^2} = 2,83,$$

а критический момент в соответствии с (5.9) на искусственной характеристике не изменится:  $M_k = 442 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Подставляя  $s_{к.и}$ ,  $M_k$  и новое значение  $a = R_1 / R'_2 = 0,34 / 6,39 = 0,05$  в (5.11), получим следующую расчетную формулу для механической характеристики:

$$M = 2 \cdot 442 (1 + 0,05 \cdot 2,83) / (s / 2,83 + 2,83 / s + 2 \cdot 0,05 \cdot 2,83).$$

Задавая ряд значений скольжения  $s$ , определим скорость и момент АД:

$s$ .....	0	0,43	0,6	0,8	1	2,83
$\omega$ , рад/с .....	104,8	59,4	41,9	21	0	-192
$M$ , Н·м .....	0	159	194	246	291	442

**Задача 5.5.** Для АД типа 4А160S (см. задачу 5.2) рассчитать сопротивление резистора  $R_{2д}$ , включение которого в цепь статора обеспечивает снижение пускового момента на 20% ( $\mu = 0,8$ ).

**Задача 5.6.** Для АД типа МТН-312-6 (см. задачу 5.1) рассчитать сопротивление  $R_{2д}$ , включение которого в цепь ротора позволит получить пусковой момент двигателя, равный критическому.

**Задача 5.7.** Для АД типа МТН-312-6 (см. задачу 5.1) построить пусковую диаграмму и рассчитать сопротивление пусковых резисторов в цепи ротора, обеспечивающих пуск АД в две ступени ( $m = 2$ ) при  $M_c = M_{ном}$ . Рабочий участок механических характеристик АД принять линейным.

## 5.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Изменение напряжения, подводимого к статору АД, позволяет осуществлять в статических и динамических режимах регулирование его координат с хорошими показателями и с помощью относительно простых схем управления (рис. 5.9), а также обеспечивать экономичные режимы работы двигателя.

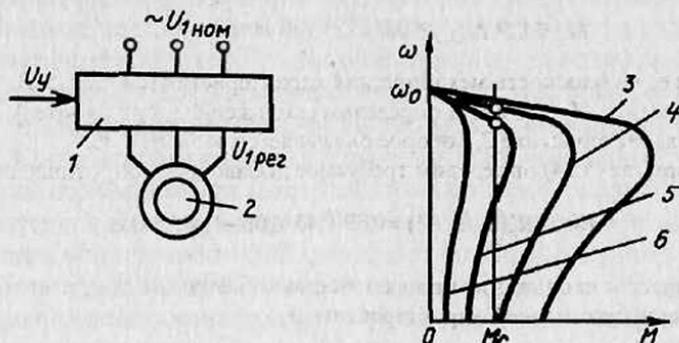


Рис. 5.9

Для регулирования координат АД между сетью переменного тока со стандартным напряжением  $U_{ном}$  и статором двигателя 2 включен регулятор напряжения 1, выходное напряжение которого  $U_{1рег}$  изменяется с помощью маломощного внешнего сигнала управления  $U_y$  в пределах от значения сетевого напряжения  $U_{ном}$  и практически до нуля. При этом частота напряжения на двигателе не изменяется и равна стандартной (50 Гц).

Регулирование напряжения на статоре не приводит к изменению скорости холостого хода  $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$  и не влияет на критическое скольжение  $s_k$ , но существенно изменяет критический момент  $M_k$ . Как следует из (5.9), уменьшение  $M_k$  происходит пропорционально квадрату снижения напряжения. В результате при  $U_{1рег} = var$  искусственные характеристики 3...6, построенные соответственно при напряжениях (1; 0,8; 0,6 и 0,4)  $U_{ном}$ , оказываются малопригодными для регулирования скорости, так как по мере уменьшения напряжения резко снижаются критический момент АД и тем самым его перегрузочная способность, а диапазон регулирования скорости очень мал. Разомкнутая схема, приведенная на рис. 5.9, используется лишь для воздействия в переходных процессах на момент АД, что может требоваться, например, для обеспечения заданного ускорения движения ЭП или регулирования натяжения на исполнительном органе рабочей машины.

Изменение напряжения позволяет также в соответствии с (5.3) осуществлять регулирование (ограничение) в переходных режимах тока АД. Электромеханические характеристики при этом имеют вид кривых, показанных на рис. 5.6, а.

Для регулирования напряжения на статоре АД могут использоваться различные электротехнические устройства – автотрансформаторы, магнитные усилители, а также тиристорные регуляторы напряжения (ТРН), получившие в настоящее время наибольшее распространение из-за высокого КПД, простоты обслуживания, легкости автоматизации работы ЭП и большого их ассортимента, выпускаемого промышленностью. ТРН позволяют реализовывать самые разнообразные функции по управлению и оптимизации режимов работы ЭП с АД; на их основе строятся устройства, позволяющие формировать нужным образом динамические характеристики ЭП, они позволяют также реализовывать режимы работы АД с наилучшими энергетическими показателями при малых его нагрузках.

Рассмотрим принцип действия ТРН и основанную на его использовании распределенную систему ЭП «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель» (ТРН – АД).

На рис. 5.10, а показана схема регулирования напряжения на однофазной нагрузке переменного тока  $z_n$ . Силовая часть однофазного ТРН образована двумя тиристорами  $VS1$  и  $VS2$ , включенными по так называемой встречно-параллельной схеме, которая обеспечивает протекание тока в нагрузке в оба полупериода напряжения сети  $U_1$ . Тиристоры получают импульсы управления  $U_\alpha$  от СИФУ, которая обеспечивает их сдвиг на угол управления  $\alpha$  в функции внешнего сигнала управления  $U_y$ .

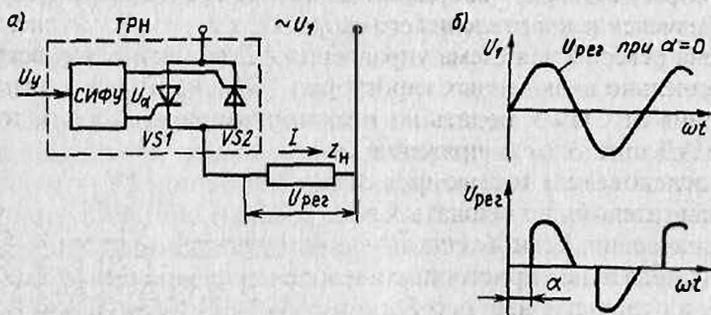


Рис. 5.10

Если на тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  не подаются импульсы управления от СИФУ, то они закрыты и напряжение на нагрузке  $U_{\text{рег}}$  равно нулю. При подаче на тиристоры импульсов управления с углом управления  $\alpha = 0$  они будут полностью открыты и к нагрузке будет

приложено все напряжение сети  $U_1 = U_{\text{пер}}$  (см. рис. 5.10, б). Если осуществлять подачу импульсов управления на тиристоры с некоторой задержкой относительно предельного режима (угол управления  $\alpha \neq 0$ ), то к нагрузке будет прикладываться часть напряжения сети. Изменяя угол управления  $\alpha$  от нуля до  $\pi$ , можно регулировать напряжение на нагрузке от полного напряжения сети до нуля.

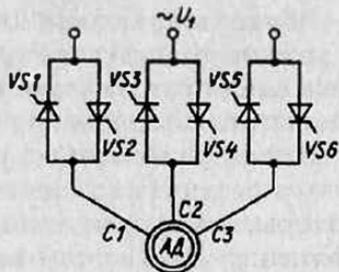


Рис. 5.11

На основе однофазной схемы, показанной на рис. 5.10, а, работают трехфазные схемы для регулирования напряжения на статоре АД, состоящие из шести тиристоров  $VS1 \dots VS6$  (рис. 5.11). Отметим, что в таких схемах вместо пары встречно-параллельно включенных тиристоров может применяться полупроводниковый прибор симистор, обеспечивающий протекание тока в фазе двигателя в обоих направлениях и имеющий такой же принцип действия, что и тиристор. Его применение сокращает число электронных приборов вдвое и упрощает схему СИФУ.

Отметим, что напряжение на нагрузке является несинусоидальным и его можно представить совокупностью нескольких синусоидальных напряжений – гармоник, каждая из которых изменяется с определенной частотой. Частота изменения первой из них (основной гармоники) равна частоте питающего напряжения, а частоты изменения других гармоник больше, чем первой. Обычно первая гармоника имеет наибольшую амплитуду и по ней ведутся все основные расчеты.

Кроме регулирования координат двигателя ТРН позволяет осуществлять изменение направления его скорости, т.е. реверс. На рис. 5.12 приведена реверсивная схема управления АД на пяти парах встречно-параллельно включенных тиристоров  $VS1 \dots VS10$ . Если сигналы управления от СИФУ подать на тиристорные пары 1, 3 и 5, то на статоре АД питающее напряжение будет с последовательностью фаз сети  $ABC$  и двигатель будет вращаться в одном направлении. Если же сигналы управления подать на тиристорные пары 2, 4 и 5, а с тиристорных пар 1 и 3 их снять, то на выводах статора АД  $C1, C2, C3$  будет уже другая последовательность фаз сетевого напряжения –  $BAC$ , при этом направление скорости магнитного поля и соответственно ротора АД изменится на обратное.

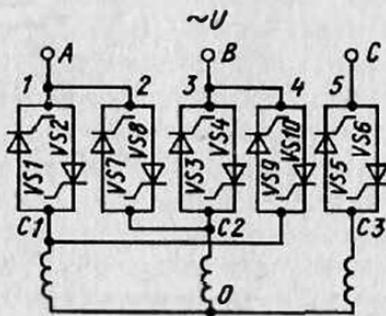


Рис. 5.12

Функциональные возможности ТРН по управлению АД этим далеко не исчерпываются. С их помощью можно обеспечивать принудительное электрическое торможение АД, формирование требуемых динамических характеристик ЭП в переходных режимах, обеспечение экономичных режимов АД при его работе с переменной нагрузкой. На базе рассмотренных схем ТРН реализуются тиристорные реверсивные и неревверсивные контакторы (пускатели) для пуска, реверса и торможения АД.

## 5.5. ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОМОЩЬЮ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Как известно из теории электрических машин, при небольших нагрузках КПД асинхронного двигателя и коэффициент мощности снижаются, что ухудшает экономические показатели его работы.

Регулирование напряжения на статоре АД в сторону его уменьшения позволяет повысить экономичность его работы при небольших механических нагрузках и холостом ходе ЭП.

Поскольку число асинхронных ЭП в промышленности и коммунальном хозяйстве очень велико, то эффект от регулирования напряжения с целью повышения их энергетических показателей может быть весьма значительным.

Рассмотрим принципы построения ЭП, в котором минимизируется потребляемый АД ток и тем самым потери электроэнергии в нем. Для этого обратимся к зависимостям тока статора  $I_1$  от напряжения  $U_1$  (рис. 5.13, а) при разных моментах нагрузки  $M_c$ . Как видно из графиков 1...4, построенных соответственно при  $M_{c1} < M_{c2} < M_{c3} < M_{c4}$ , для каждого момента имеется такое напряжение, при котором потреб-

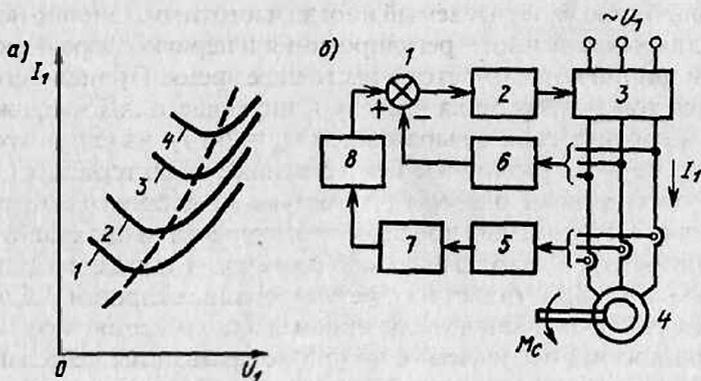


Рис. 5.13

ляемый АД ток из сети минимален. Штриховая линия, проведенная через точки минимумов тока для каждой нагрузки, определяет закон регулирования напряжения в функции тока, при реализации которого при любом  $M_c$  из сети потребляется минимальный ток.

Схема ЭП с минимизацией потребляемого двигателем тока приведена на рис. 5.13, б. Она включает в себя двигатель 4, регулятор напряжения 3 с СИФУ 2, датчики тока 5 и напряжения 6, функциональный преобразователь 7, инерционное звено 8 и элемент сравнения 1.

Требуемый закон управления ЭП реализуется с помощью положительной обратной связи по току. Трехфазный датчик 5 вырабатывает пропорциональный току сигнал, поступающий на вход функционального преобразователя 7, который обеспечивает требуемую зависимость между напряжением на АД и моментом нагрузки на его валу (штриховая линия на рис. 5.13, а). В схеме используется вспомогательная отрицательная обратная связь по напряжению (звено 8), с помощью которой обеспечивается необходимое качество переходных процессов. Кроме минимизации потерь электроэнергии, простыми средствами в такой схеме осуществляется повышение КПД и коэффициента мощности асинхронного ЭП.

Как показывают теоретические расчеты и экспериментальные данные, регулирование напряжения на статоре позволяет повысить энергетические показатели ЭП на несколько процентов, что при широком применении асинхронных двигателей дает возможность получить большой экономический эффект.

## 5.6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Данный способ, называемый иногда частотным, широко используется для качественного регулирования в первую очередь скорости АД и широко применяется в настоящее время. Принцип его заключается том, что изменяя частоту  $f_1$  питающего АД напряжения, можно в соответствии с выражением  $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$  изменять его скорость  $\omega_0$ , получая различные искусственные характеристики. Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а получаемые при этом характеристики обладают высокой жесткостью. Частотный способ к тому же отличается и еще одним весьма важным свойством: регулирование скорости АД в этом случае не сопровождается увеличением его скольжения, поэтому потери мощности, определяемые по (5.5), оказываются небольшими.

Для лучшего использования и получения высоких энергетических показателей работы АД (коэффициентов мощности, полезного

действия и перегрузочной способности) одновременно с частотой необходимо изменять и подводимое к нему напряжение. Рациональный закон изменения напряжения при этом зависит от характера момента нагрузки  $M_c$ . Так, при постоянном моменте нагрузки  $M_c = \text{const}$  напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально его частоте

$$U_1 / f_1 = \text{const}. \quad (5.29)$$

Для вентиляторного характера момента нагрузки соотношение (5.29) будет иметь вид

$$U_1 / f_1^2 = \text{const}, \quad (5.30)$$

а при моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости,

$$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const}. \quad (5.31)$$

Таким образом, при реализации частотного способа регулирования скорости АД используется преобразователь частоты, который позволяет также регулировать и напряжение на его статоре.

Отметим, что на практике используются и более сложные по сравнению с выражениями (5.29) ... (5.31) законы частотного управления, в частности учитывающие наличие активного сопротивления статора.

Схема включения АД и его характеристики при изменении частоты (рис. 5.14). Необходимым элементом ЭП является преобразователь частоты и напряжения  $I$  (в дальнейшем используется обозначение ПЧ), на вход которого подается стандартное напряжение сети  $U_1$  (220, 380 В и т.д.) промышленной частоты  $f_1 = 50$  Гц, а с выхода снимается переменное напряжение  $U_{1\text{рег}}$  регулируемой частоты  $f_{1\text{рег}}$  (см. рис. 5.14, а). Соотношения  $U_1 / f_1$  определяются формулами (5.29) ... (5.31). Регулирование выходной частоты и напряжения осуществляется с помощью управляющего сигнала  $U_y$ , который задает требуемое значение скорости двигателя 2.

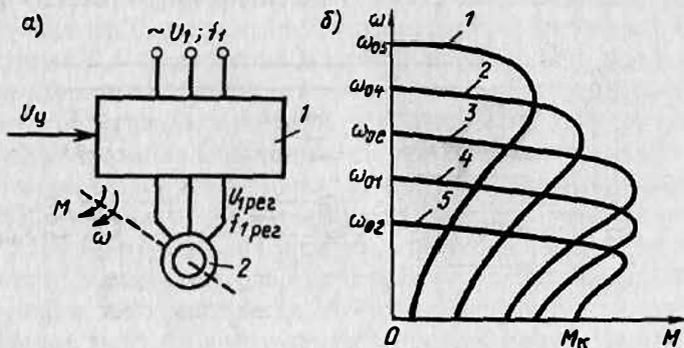


Рис. 5.14

Анализ механических характеристик двигателя при его управлении по наиболее распространенному закону  $U_1/f_1 = \text{const}$  показывает, что скорость идеального холостого хода двигателя изменяется пропорционально частоте напряжения, а критический момент  $M_k$  остается неизменным, что следует из упрощенного выражения (5.13). Действительно, так как  $\omega_0 \sim f_1$  и  $x_k \sim f_1$ , то критический момент  $M_k \sim U_1^2/f_1^2 \sim U_1/f_1 = \text{const}$ .

Механические характеристики (см. рис. 5.14, б) при частотном регулировании разделяются на характеристики, соответствующие частотам ниже номинальной (сетевой)  $f_{1\text{ном}}$  и выше ее.

**Область частот  $f_1 < f_{1\text{ном}}$ .** В этой области для частот  $f_{13} = f_{1\text{ном}} > f_{14} > f_{15}$  (характеристики 3...5) выполняется соотношение  $U_1/f_1 = \text{const}$ , так как напряжение, подводимое к АД, регулируется от номинального (сетевого) в сторону уменьшения. Поэтому  $M_k = \text{const}$  и АД имеет постоянную перегрузочную способность. Отметим, что из-за влияния сопротивления  $R_1$ , которое не учитывалось при выводе формулы (5.13), момент  $M_k$  в области малых скоростей АД несколько снижается, поэтому для поддержания  $M_k = \text{const}$  напряжение при малой частоте должно уменьшаться не пропорционально  $\omega$ , а несколько в меньшей степени.

**Область частот  $f_1 > f_{1\text{ном}}$ .** По условиям нормальной работы АД нельзя повышать напряжение сверх номинального (паспортного). Поэтому регулирование скорости в этой области ведется при  $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$  (характеристики 1 и 2 при частотах  $f_{11}$  и  $f_{12}$ ), т.е. критический момент  $M_k$  в соответствии с (5.13) будет уменьшаться при увеличении частоты ( $f_{11} > f_{12} > f_{1\text{ном}}$ ).

**Принцип действия ПЧ.** Различные ПЧ, которые нашли применение в частотных асинхронных ЭП, можно разделить на две группы, отличающиеся используемыми техническими средствами и структурой.

Первую группу составляют так называемые *электромашины вращающиеся ПЧ*, в которых для получения переменной частоты используются обычные или специальные электрические машины. На рис. 5.15 приведена схема ПЧ с синхронным генератором 4, от

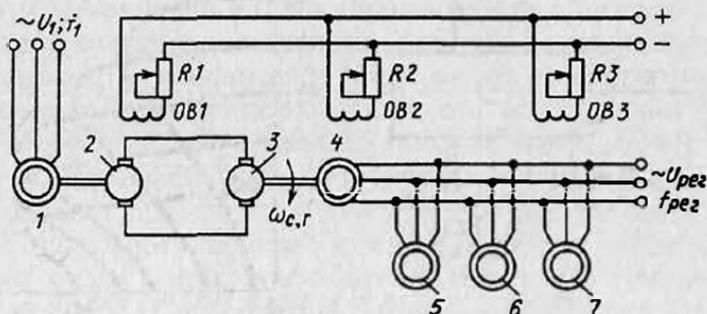


Рис. 5.15

которого питаются три асинхронных двигателя 5...7. Преобразователь состоит из двух частей: агрегата постоянной скорости, включающего в себя асинхронный двигатель 1 (вместо него может быть использован двигатель любого типа) и приводимый им во вращение генератор постоянного тока 2, и агрегата переменной скорости, состоящего из регулируемого двигателя постоянного тока 3, приводящего во вращение синхронный генератор переменной частоты. Двигатель 1 питается от сети со стандартной частотой  $f_1 = 50$  Гц, а на выводах синхронного генератора 4 частота и напряжение могут регулироваться. С помощью резистора  $R_1$  в цепи обмотки возбуждения генератора 2 изменяется напряжение, подводимое к якору двигателя 3, и тем самым его скорость и скорость генератора 4. При этом меняется частота напряжения на выводах синхронного генератора 4, определяемая выражением  $f_{\text{пер}} = p\omega_{\text{с.г}}/(2\pi)$ , а значит, и на двигателях 5...7. Напряжение на этих двигателях регулируется с помощью резистора  $R_2$ , включенного в цепь обмотки возбуждения синхронного генератора 4.

Применение ПЧ позволяет плавно регулировать скорость двигателей 5...7 в широком диапазоне, однако процесс регулирования частоты в электромашинном ПЧ имеет существенные недостатки. Для создания такого преобразователя необходимы четыре электрические машины, рассчитанные на полную мощность потребителей (группы АД), что определяет его громоздкость и высокую цену, особенно при больших мощностях нагрузки. Двойное преобразование энергии – энергии переменного тока с частотой  $f_1 = 50$  Гц в энергию постоянного тока и затем опять в энергию переменного тока регулируемой частоты – сопровождается потерей энергии во всей цепи, определяя невысокий КПД системы. Например, если КПД каждой из четырех электрических машин 1...4 ПЧ составляет 0,9, то его общий КПД будет равен 0,66, т.е. треть потребляемой из сети мощности теряется. Кроме того, коллекторные машины постоянного тока требуют непрерывного надзора и ухода при эксплуатации, а их работа сопровождается шумом. И, наконец, процесс изменения частоты в электромашинном ПЧ инерционен, что объясняется механической инерцией электромашинного агрегата.

Известны также и другие схемы вращающихся ПЧ с использованием как обычных, так и специальных электрических машин.

В настоящее время большое распространение получили *статические ПЧ*, названные так потому, что в них используются не имеющие движущихся частей элементы и устройства, такие как полупроводниковые приборы, реакторы, конденсаторы и др. Развитие статических ПЧ особенно ускорилось в связи с массовым производством тиристоров и силовых транзисторов. Использование статических ПЧ позволило повысить технико-экономические показа-

тели регулируемого частотного ЭП: увеличить его КПД и быстродействие, устранить шум и упростить обслуживание.

Статические ПЧ могут быть без звена постоянного тока с непосредственной связью питающей сети и нагрузки и с промежуточным звеном постоянного тока. Рассмотрим схемы и принцип действия каждого вида ПЧ.

Упрощенная функциональная схема ПЧ без звена постоянного тока (позиция 1 на рис. 5.16) включает в себя силовую часть 3, с которой связан асинхронный двигатель 4, и блок управления 2. С помощью этой схемы осуществляется преобразование электрической энергии переменного тока стандартных напряжения  $U_1$  и частоты  $f_1$  в энергию переменного тока с регулируемым напряжением  $U_{пер}$  и частотой  $f_{пер}$ . Силовая часть ПЧ выполняется на базе полупроводниковых приборов (тиристоров или транзисторов), управляемых сигналами с блока 2, и в некоторых случаях содержит согласующие трансформаторы.

Одна из распространенных схем тиристорного трехфазного ПЧ с непосредственной связью (НПЧ), состоящая из трех одинаковых комплектов тиристоров 2, 3, 4, обеспечивающих питание обмоток статора АД  $z_a, z_b$  и  $z_c$ , показана на рис. 5.17. К комплектам тиристоров подсоединены начала фазных обмоток  $C1, C2, C3$ , а концы этих обмоток подключены к нулевой точке трансформатора 1. Каждый из трех комплектов содержит шесть тиристоров, из которых три анодами и три катодами подсоединены ко вторичным обмоткам трансформатора 1. Нулевая точка трансформатора соединена с общей точкой трехфазной обмотки статора, поэтому схема называется нулевой. Каждая фаза этой схемы работает независимо от остальных, поэтому для пояснения принципа ее действия можно рассмотреть работу одной из фаз, например  $A$ , управляемую комплектом 2 тиристоров  $VS1 \dots VS6$ .

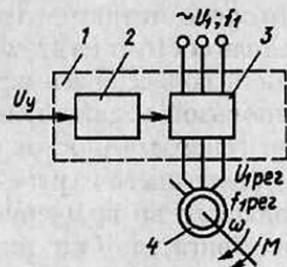


Рис. 5.16

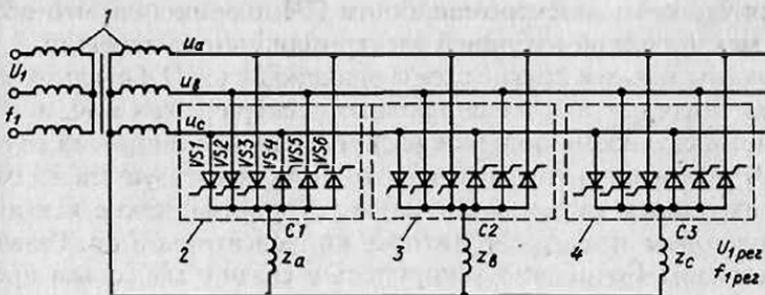


Рис. 5.17

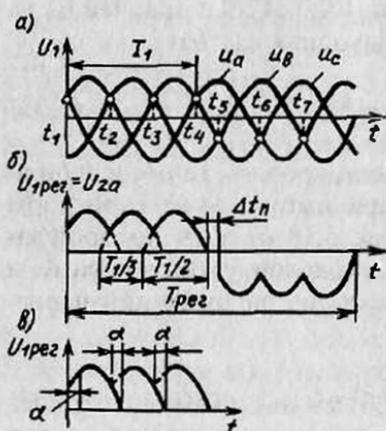


Рис. 5.18

Подадим теперь от блока управления импульсы на тиристоры  $VS1$  в момент времени  $t_1$  (см. рис. 5.18, а), на  $VS2$  – в момент  $t_2$  и на  $VS3$  – в момент  $t_3$ . Так как в эти моменты времени потенциалы анодов тиристоров более высокие, чем катодов, то они откроются и к фазе статора будет приложено напряжение, соответствующее участкам трех синусоид вторичных напряжений трансформатора  $u_a$ ,  $u_b$  и  $u_c$ . Если снять управляющие импульсы с тиристоров  $VS1 \dots VS3$  и подать импульсы на тиристоры  $VS6$ ,  $VS4$  и  $VS5$  в моменты времени  $t_5$ ,  $t_6$  и  $t_7$ , то на нагрузке также образуется напряжение, соответствующее участкам трех синусоид, но уже противоположной полярности. При поочередном открытии групп тиристоров  $VS1 \dots VS3$  и  $VS4 \dots VS6$  в указанном порядке изображенная на рис. 5.18, б кривая  $U_{1per}$  будет периодически повторяться. Таким образом, к фазе обмотки статора подводится напряжение переменного тока с периодом  $T_{per}$  и частотой  $f_{per} = 1/T_{per}$ . Период  $T_{per}$  этого напряжения больше, чем период сетевого напряжения  $T_1$  (см. рис. 5.18, а), или, другими словами, частота напряжения на статоре АД меньше, чем частота питающего напряжения. Соотношение между этими величинами для трехфазной схемы определяется соотношением

$$T_{per} = T_1 [3 + 2(h-1)]/3, \quad (5.32)$$

где  $h = 2, 3, \dots$  – число открываемых тиристоров в комплекте.

Из (5.32) следует, что ПЧ без звена постоянного тока с непосредственной связью питающей сети и нагрузки может обеспечивать регулирование частоты на статоре АД только в сторону ее уменьшения по сравнению с сетевой.

Расширение диапазона регулирования частоты на выходе ПЧ достигается введением паузы  $\Delta t_n$  (см. рис. 5.18, б) между моментом сня-

Предположим, что фазные напряжения на вторичных обмотках трансформатора изменяются по синусоидальному закону (рис. 5.18, а), а нагрузка имеет активный характер (если нагрузкой является АД, то ее характер будет активно-индуктивный).

Предположим также, что тиристоры  $VS1 \dots VS6$  (см. рис. 5.17) закрыты (управляющие импульсы от блока управления на них не подаются). В этом случае все напряжение с выхода трансформатора прикладывается к закрытым тиристорам и напряжение на статоре равно нулю.

тия импульсов управления с тиристоров  $VS1... VS3$  и подачи их на тиристоры  $VS4... VS6$ . В этом случае выходная частота

$$f_{\text{пер}} = 3f_1 / (3 + 2(h-1) + \Delta t_{\text{п}} f_1). \quad (5.33)$$

Рассматриваемые ПЧ позволяют регулировать также и напряжение  $U_{\text{пер}}$  на АД, для чего управляющие импульсы на тиристоры подаются не в моменты  $t_1, t_2, t_3, \dots$  (см. рис. 5.18, а), а с некоторой задержкой, которая соответствует углу управления тиристорами  $\alpha$  (см. рис. 5.18, в). Действующее напряжение на нагрузке при непрерывном токе в ней

$$U_{\text{пер}} = \sqrt{2} m_1 U_{\phi} \sin(\pi/m_1) \cos(\alpha/\pi) = U_{\text{перmax}} \cos \alpha, \quad (5.34)$$

где  $m_1$  – число фаз питающего напряжения;  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети.

Изменяя с помощью системы управления момент подачи импульсов на тиристоры, можно регулировать напряжение нагрузки от 0 ( $\alpha = 90^\circ$ ) до максимального значения ( $\alpha = 0$ ).

Отметим, что полученные соотношения правомерны и при активно-индуктивной нагрузке ПЧ. В этом случае несколько изменяется лишь форма напряжения.

Одним из недостатков схемы, показанной на рис. 5.17, является необходимость наличия нулевого вывода трансформатора и обмоток статора АД. Поэтому на практике распространение получили и так называемые мостовые схемы ПЧ, в которых нулевой провод отсутствует.

Схема ПЧ со звеном постоянного тока (рис. 5.19) состоит из двух основных блоков: управляемого выпрямителя 2 и управляемого инвертора 3 с блоками управления 1 и 5. Напряжение сети  $U_1$  стандартной частоты  $f_1$  подается на вход управляемого выпрямителя 2, преобразующего переменное напряжение  $U_1$  в постоянное  $E_0$ , которое можно регулировать в широких пределах с помощью блока управления 1.

Выпрямленное и регулируемое напряжение  $E_0$  подается на вход инвертора 3, который преобразует его в трехфазное напряжение  $U_{1\text{пер}}$  регулируемой частоты  $f_{1\text{пер}}$ , поступающее на двигатель 4. Частота выходного напряжения инвертора  $f_{1\text{пер}}$  регулируется блоком управления 5 в функции сигнала управления  $U_y$ .

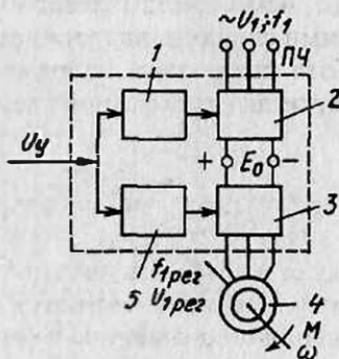


Рис. 5.19

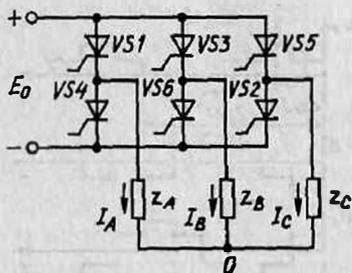


Рис. 5.20

налем с блока управления открываются в требуемой последовательности. Обычно продолжительность открытого состояния каждого тиристора  $\lambda$  составляет половину или треть периода  $T_{\text{per}} = 1/f_{\text{per}}$ , а сдвиг моментов открытия тиристоров  $VS1 \dots VS6$  – шестую часть этого периода.

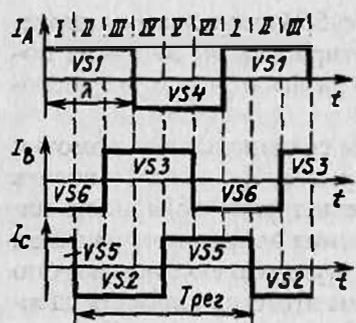


Рис. 5.21

Остановимся подробнее на работе управляемого инвертора (рис. 5.20), полагая, что с помощью того или иного управляемого выпрямителя на его вход подается постоянное напряжение  $E_0$ .

Предположим, что трехфазная нагрузка  $z_A, z_B$  и  $z_C$  (обмотки статора АД) соединена в звезду, а тиристоры  $VS1 \dots VS6$ , на которых выполнен инвертор, соединены по мостовой схеме и по сигналам с блока управления открываются в требуемой последовательности.

Обычно продолжительность открытого состояния каждого тиристора  $\lambda$  составляет половину или треть периода  $T_{\text{per}} = 1/f_{\text{per}}$ , а сдвиг моментов открытия тиристоров  $VS1 \dots VS6$  – шестую часть этого периода. Рассмотрим сначала работу схемы со временем открытия тиристоров  $\lambda = T_{\text{per}}/2$ . Временная токовая диаграмма работы тиристоров для этого случая показана на рис. 5.21, где токи фаз  $I_A, I_B, I_C$ , проходящие через нечетные тиристоры, отложены в положительном направлении, а через четные – в отрицательном. В каждый момент времени включены (открыты) три тиристора из шести, причем за время периода можно выделить шесть интервалов (I, II, III, IV, V, VI) различных сочетаний открытых и закрытых состояний тиристоров. Для определения формы напряжения на нагрузке рассмотрим схемы включения фаз статора АД на каждом из шести временных интервалов.

В течение интервала I открыты тиристоры  $VS1, VS5$  и  $VS6$ , начала фаз нагрузок  $z_A$  и  $z_C$  соединены с плюсовым выводом источника

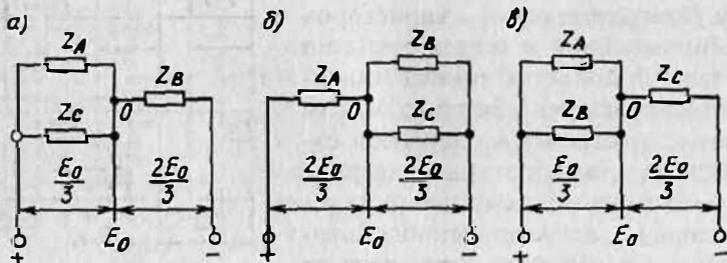


Рис. 5.22

$+E_0$ , а начало фазы нагрузки  $z_B$  — с минусовым выводом  $-E_0$  (рис. 5.22, а). Если при этом сопротивления всех трех фаз одинаковы, то эквивалентное сопротивление параллельно соединенных фаз нагрузок  $z_A$  и  $z_C$  будет в два раза меньше сопротивления фазы нагрузки  $z_B$ . Тогда и напряжение на параллельно соединенных фазах нагрузок  $z_A$  и  $z_C$  будет в два раза меньше, чем на фазе нагрузки  $z_B$ , и составит  $E_0/3$ .

На интервале II (см. рис. 5.21) открыты тиристоры VS1, VS6 и VS2 (тиристор VS5 закрыт), фазы нагрузок  $z_B$  и  $z_C$  (см. рис. 5.22, б) включены параллельно, к ним прикладывается напряжение  $E_0/3$ , а к фазе нагрузки  $z_A$  — напряжение  $2E_0/3$ .

При переходе к интервалу III (см. рис. 5.21) закрывается тиристор VS6 и открывается тиристор VS3 (тиристоры VS1 и VS2 по-прежнему открыты), в соответствии с чем фазы нагрузок  $z_A$  и  $z_B$  включаются параллельно (см. рис. 5.22, в).

Аналогично можно изобразить схемы соединения фаз обмотки статора для интервалов IV, V и VI, которые будут соответствовать схемам для интервалов I, II и III, но иметь другую полярность напряжения на началах фаз. График изменения напряжения на фазах нагрузки при  $\lambda = T_{\text{пер}}/2$  (рис. 5.23) имеет ступенчатую форму, и оно является переменным, причем максимумы этого напряжения сдвинуты по фазам на треть периода регулируемой частоты. Другими словами, на нагрузке получается стандартная система трехфазного напряжения переменного тока, хотя и несинусоидальной формы.

Несколько другой формы выходное напряжение ПЧ будет в том случае, если продолжительность открытого состояния каждого тиристора будет составлять треть периода  $T_{\text{пер}}$  регулируемой частоты  $f_{\text{пер}}$ , а нагрузка будет по-прежнему соединена в звезду. Диаграмма работы тиристорov и график изменения напряжения на нагрузке при  $\lambda = T_{\text{пер}}/3$  приведены соответственно на рис. 5.24 и 5.25. В этом случае в каждый интервал времени открыты лишь два тиристора и две фазы обмотки статора АД оказываются последовательно включенными на напряжение  $E_0$ , а третья фаза отключена от источника, соответственно напряже-

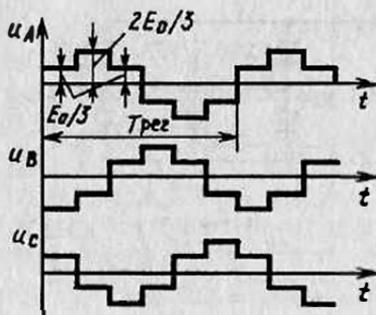


Рис. 5.23

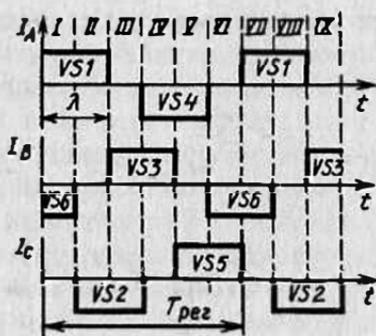


Рис. 5.24

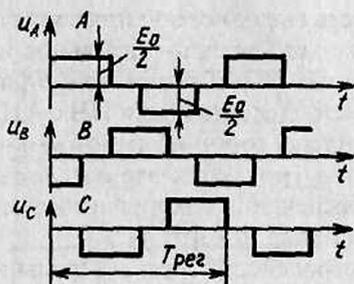


Рис. 5.25

ние на каждой из последовательно соединенных фаз равно  $E_0/2$ , а на третьей (свободной) равно нулю.

Аналогично можно проанализировать работу схемы, показанной на рис. 5.20, и при соединении трехфазной нагрузки в треугольник. Оказывается, что при  $\lambda = T_{\text{пер}}/2$  форма напряжения на фазах нагрузки аналогична кривым, приведенным на рис. 5.25, но с амплитудой напряжения, равной  $E_0$ , а при  $\lambda = T_{\text{пер}}/3$  форма

напряжения повторяет кривые, показанные на рис. 5.23, но с заменой  $E_0/3$  на  $E_0/2$  и  $2E_0/3$  на  $E_0$ .

Важной особенностью ПЧ со звеном постоянного тока является возможность обеспечения с их помощью плавного регулирования частоты напряжения на статоре АД как ниже, так и выше сетевой, в силу чего такие ПЧ получили наибольшее распространение.

**Виды управляемых инверторов.** В частотно-управляемом асинхронном ЭП применяются различные инверторы, отличающиеся видами коммутации тиристоров, схемами их соединения, способами регулирования напряжения на АД и др.

В зависимости от способа коммутации тока тиристоров инверторы делятся на ведомые сети и автономные. В инверторах, ведомых сетью (их еще называют зависимыми инверторами), коммутация тока с тиристора на тиристор обеспечивается напряжением источника питания.

В автономных (независимых) инверторах для коммутации тока используются дополнительные элементы – тиристоры, диоды, конденсаторы и катушки индуктивности (дроссели).

Автономные инверторы делятся на инверторы напряжения и тока. Автономные инверторы напряжения (АИН) подключаются к источнику напряжения, например управляемому выпрямителю, на выходе которого устанавливается конденсатор большой емкости. АИН имеют жесткую внешнюю характеристику, т. е. с изменением тока нагрузки напряжение на их выходе практически не изменяется, поэтому при использовании АИН управляющими воздействиями для двигателя являются частота и напряжение.

Автономные инверторы тока (АИТ) питаются от источника тока, например управляемого выпрямителя, к выходу которого подключается реактор большой индуктивности. При использовании АИТ управляющими воздействиями для АД являются частота и ток статора.

Каждый из видов автономного инвертора имеет в частотно-управляемых асинхронных ЭП свою область применения. Для АИН

характерны практическая независимость выходного напряжения от режима работы АД, что обуславливает его предпочтительное использование в разомкнутых асинхронных ЭП, а также при управлении группой регулируемых двигателей. Недостатками ПЧ с АИН являются использование на входе конденсаторов большой емкости, большого числа тиристоров и коммутирующих элементов; необходимость введения в схему для обеспечения рекуперации энергии в сеть дополнительного ведомого сетью инвертора.

ПЧ с АИТ позволяют создавать быстродействующие реверсивные ЭП, работающие в интенсивном повторно-кратковременном режиме. К достоинствам таких преобразователей относятся также отсутствие конденсатора на входе АИТ; возможность рекуперации (отдачи) активной энергии в сеть без усложнения схемы; использование относительно небольшого числа тиристоров и силовых диодов. Недостатком АИТ является необходимость включения входного реактора.

Регулирование выходного напряжения ПЧ может осуществляться несколькими способами. В ПЧ с непосредственной связью оно осуществляется так же, как и в управляемых выпрямителях. Такое управление получило название фазового.

В ПЧ со звеном постоянного тока регулирование напряжения на нагрузке (статоре АД) производится двумя способами – или с помощью специального регулятора напряжения, или самим инвертором.

Первый способ, в свою очередь, может быть реализован двумя путями – за счет использования управляемого выпрямителя (фазовое управление) или неуправляемого выпрямителя и размещаемого между ним и инвертором широтно-импульсного преобразователя (ШИП) (амплитудное регулирование напряжения). К достоинствам этого способа следует отнести широкий диапазон регулирования напряжения и возможность использования для любого типа инвертора.

Второй способ связан с совмещением функций регулирования частоты и напряжения в самом инверторе. Оно реализуется с помощью соответствующих алгоритмов управления тиристорами и предусматривает использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

На рис. 5.26 для примера показана схема силовой части ЭП с асинхронным двигателем 3, в котором использован тиристорный ПЧ со звеном постоянного тока и автономный инвертор напряжения 2. В этой схеме на выходе управляемого выпрямителя 1 включены реактор  $L_0$  и конденсатор  $C_0$  фильтра, обеспечивающий вместе с диодами  $VD7... VD12$  циркуляцию реактивной мощности. Автономный инвертор напряжения 2 выполнен на тиристорах  $VS1... VS6$ . Конденсаторы  $C$  и реакторы  $L$  вместе с диодами  $VD1... VD6$  образуют цепи ис-

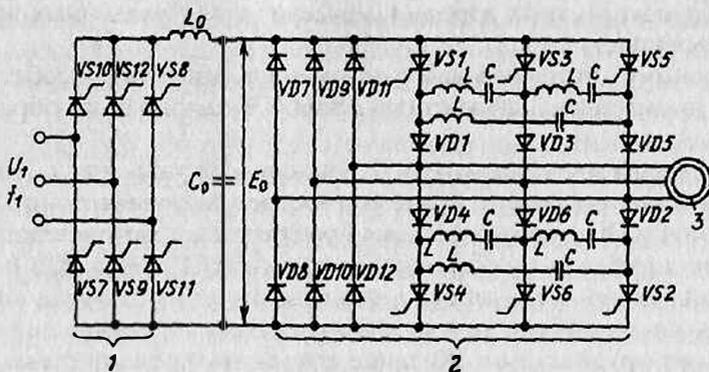


Рис. 5.26

куственной коммутации, обеспечивающие выключение тиристоров  $VS1 \dots VS6$  в нужные моменты времени. Амплитуда напряжения на выходе инвертора регулируется изменением напряжения  $E_0$  на его входе с помощью блока управления выпрямителем  $I$ , а его частота  $f_{\text{пер}}$  определяется частотой коммутации тиристоров  $VS1 \dots VS6$ , задаваемой блоком управления инвертором.

Приведенная на рис. 5.26 схема ПЧ является хотя и распространенной, но далеко не единственной. На практике нашли применение и другие схемы, отличающиеся способами регулирования напряжения и видами искусственной коммутации тиристоров. Широкие перспективы применения ПЧ связаны с использованием в них силовых транзисторов (в частности, биполярных с изолированным затвором в модульном исполнении) и средств микропроцессорной техники для реализации схем управления.

Частотное управление является весьма экономичным, так как обеспечивает регулирование скорости АД без больших потерь мощности в роторной цепи, ухудшающих КПД ЭП и приводящих к необходимости завышения мощности АД.

Частотное регулирование скорости может осуществляться плавно, в широком диапазоне, в обе стороны от естественной характеристики, т. е. АД может иметь скорость как больше, так и меньше номинальной. При этом регулировочные характеристики имеют высокую жесткость, а АД сохраняет большую перегрузочную способность.

Реализуемый диапазон регулирования скорости в разомкнутых системах составляет  $5 \dots 10$ , а в замкнутых системах (при использовании обратных связей) его значение может достигать 1000 и более.

В силу отмеченных высоких показателей частотный способ находит в настоящее время все более широкое применение. Более того, можно назвать примеры, когда использование частотно-управляемого асинхронного ЭП является единственно возможным: привод высокоскоростных электродвигателей, электроверетен, вентилято-

ов высокоскоростных аэродинамических труб, различных испытательных стендов и др.

Широкому внедрению частотного ЭП во многом способствует выпуск промышленностью статических ПЧ самого разнообразного исполнения.

**Квазичастотное управление АД.** Частотное управление АД, обеспечивая качественное и экономичное регулирование скорости асинхронных ЭП, требует для своей реализации использования достаточно дорогих и функционально сложных ПЧ. Наладка и эксплуатация таких ЭП, особенно при невысокой квалификации обслуживающего персонала и в сложных условиях, связаны с определенными трудностями. Желание сохранить преимущества частотного способа регулирования скорости при использовании более простых схем преобразователей привело к разработке так называемого квазичастотного (подобного частотному) способа управления АД.

Этот способ управления характерен тем, что позволяет получать пониженную регулируемую частоту напряжения на статоре АД с помощью тиристорных регуляторов напряжения, рассмотренных в разд. 5.4, и обеспечивает получение низких скоростей асинхронного ЭП, которые необходимы при работе, например, различных грузоподъемных механизмов.

Основу схемы асинхронного ЭП с квазичастотным управлением (рис. 5.27, а) составляет стандартный регулятор напряжения 1, состоящий из трех пар встречно-параллельно включенных тиристоров  $VS1... VS6$  и блока управления 2. Сигнал управления  $U_y$ , поступающий на вход блока управления, формируется с помощью специального блока квазичастотного управления 3, обеспечивающего такое управление тиристоров  $VS1... VS6$ , при котором частота  $f_{\text{пер}}$  подводимого к асинхронному двигателю 4 напряжения оказывается ниже частоты сети  $f_1$ .

На рис. 5.27, б показаны кривые фазных напряжений сети  $u_A, u_B, u_C$  и графики напряжений  $u_{C1}, u_{C2}$  и  $u_{C3}$  на зажимах  $C1, C2$  и  $C3$  обмотки статора, сформированные из сетевого напряжения за счет соответствующего управления тиристорами  $VS1... VS6$ . Как видно, напряжение фаз статора АД имеет несинусоидальную форму и изменяется с частотой, меньшей частоты сети. Рассматриваемый принцип получения пониженной частоты во многом повторяет принцип действия ПЧ с непосредственной связью (см. рис. 5.17 и 5.18), однако в этом случае регулирование частоты достигается с помощью более простой схемы преобразователя.

Регулируемая частота на статоре АД может принимать дискретные значения в соответствии с формулой  $f_{\text{пер}} = a f_1 / (a + b)$ , где  $a$  и  $b$  — произвольные целые числа от 1 до 15. Из этой формулы следует,

что регулирование частоты при квазичастотном управлении АД может происходить от уровня  $0,5f_1$  и ниже.

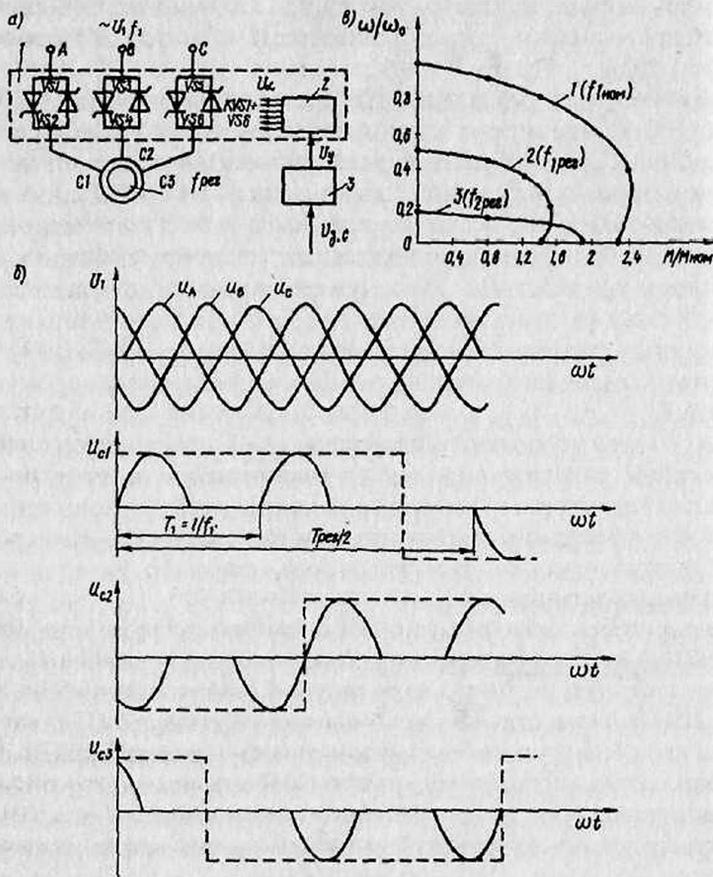


Рис. 5.27

Жесткость рабочих участков искусственных механических характеристик 2 и 3 (см. рис. 5.27, б) примерно соответствует естественной характеристике 1, а максимальный момент составляет 60...90% критического момента АД на естественной характеристике.

### 5.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ

Этот способ регулирования может быть реализован только при использовании специальных АД, получивших название многоскоростных. Особенностью этих двигателей является статорная обмотка,

состоящая из двух одинаковых секций (полуобмоток), используя разные схемы соединения которых можно изменять число пар полюсов  $p$ . В соответствии с формулой  $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$  при этом изменяется скорость вращения магнитного поля  $\omega_0$ , а значит, и скорость АД. Ротор многоскоростных АД обычно выполняется короткозамкнутым.

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

Рассмотрим схемы соединения секций обмотки статора для изменения числа пар полюсов АД (рис. 5.28).

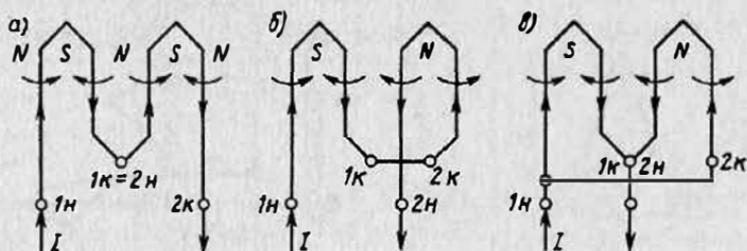


Рис. 5.28

Пусть фаза статорной обмотки состоит из двух одинаковых секций 1N — 1K, 2N — 2K, имеющих каждая по два проводника (см. рис. 5.28, а) и соединенных последовательно и согласно. По обмотке статора в данный момент времени протекает ток в направлении, показанном стрелками. Используя известное правило буравчика, определим направление магнитных силовых линий, создаваемых протекающим по проводникам током  $I$ . Нетрудно заметить, что магнитное поле имеет в этом случае четыре полюса, или  $p = 2$ .

Изменим теперь схему соединения секций, включив их последовательно и встречно (см. рис. 5.28, б), оставив при этом прежнее направление подводимого к обмотке тока. В этом случае статорная обмотка образует уже магнитное поле с вдвое меньшим числом пар полюсов. Уменьшение вдвое числа пар полюсов достигается и в схеме, показанной на рис. 5.28, в, где секции соединены параллельно. В том и другом случае уменьшение числа пар полюсов достигается изменением направления тока на противоположное в одной из секций (в данном случае во второй). При этом диапазон изменения скорости вращения магнитного поля равен двум.

Наиболее часто на практике применяются две схемы переключения статорных обмоток многоскоростных АД: с треугольника на двойную звезду и со звезды на двойную звезду. Рассмотрим схемы соединения статорных обмоток и механические характеристики АД для этих случаев.

Треугольник – двойная звезда. Для получения большего числа пар полюсов  $p_1$  секции каждой фазы статора включены последовательно и согласно и соединены в треугольник (рис. 5.29, а), где  $A_{1н}$  и  $A_{2н}$  – начала соответственно первой и второй секций фазы А;  $A_{1к}$  и  $A_{2к}$  – их концы (обозначения для выводов фаз В и С аналогичны). Схема соединения секций на рис. 5.29, б аналогична схеме, приведенной на рис. 5.28, в, и определяет уменьшение в два раза числа пар полюсов  $p_2$  АД. Схема, в которой фазы статора образованы двумя параллельно включенными секциями, получила название двойной звезды.

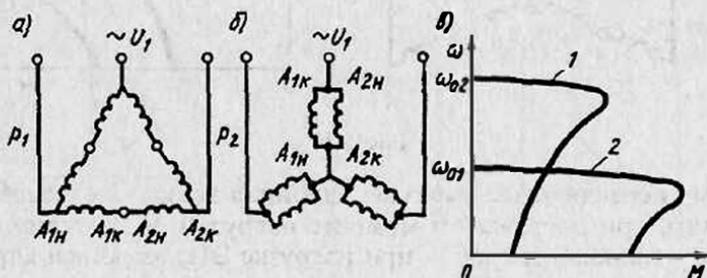


Рис. 5.29

Механические характеристики АД для схем соединения обмоток в треугольник 2 и двойную звезду 1 показаны на рис. 5.29, в.

Звезда – двойная звезда. В этом случае низкая скорость (большее число пар полюсов  $p_1$ ) соответствует схеме соединения обмоток в одинарную звезду (рис. 5.30, а), каждую фазу которой образуют последовательно соединенные секции (обозначения см. на рис. 5.29, а). Переключение на двойную звезду осуществляется по схеме, показанной на рис. 5.29, б, при этом число пар полюсов  $p_2$  уменьшается вдвое. Механические характеристики при соединении обмоток в звезду 2 и двойную звезду 1 двухскоростного АД изображены на рис. 5.30, б.

Помимо рассмотренных двухскоростных применяются также трех- и четырехскоростные АД. Первые из них помимо переключаемой обмотки статора, выполняемой аналогично рассмотренной выше, имеют также и одну непереключаемую обмотку. Четырехскоростные АД имеют две переключаемые обмотки статора с различным числом пар полюсов  $p_1, p_2, p_3, p_4$  и позволяют получить четыре регулировочные механические характеристики.

Рассматриваемый способ регулирования скорости АД характеризуется рядом положительных показателей, что определяет широкое его применение в асинхронных ЭП, и в первую очередь это экономичность, так как процесс изменения скорости не сопровождается выделением в роторной цепи дополнительных потерь энергии, вызывающих излишний нагрев двигателя и ухудшающих его КПД.

Механические характеристики (см. рис. 5.29, в и 5.30, б) много-скоростных АД отличаются хорошей жесткостью и достаточной перегрузочной способностью.

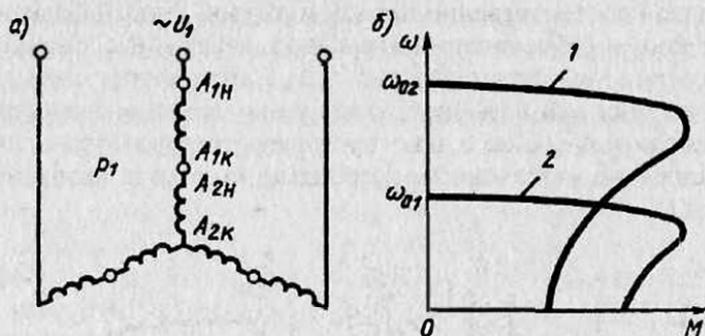


Рис. 5.30

Схему переключения «звезда – двойная звезда» целесообразно применять при постоянном моменте нагрузки  $M_c$ , а схему «треугольник – двойная звезда» – при нагрузке ЭП, имеющей характер постоянной мощности.

Недостатком рассмотренного способа является ступенчатость изменения скорости двигателя и относительно небольшой диапазон ее регулирования, обычно 6...8.

## 5.8. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В КАСКАДНЫХ СХЕМАХ ЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Регулирование скорости АД некоторыми рассмотренными ранее способами сопровождается выделением в цепи ротора потерь мощности, называемых иногда потерями скольжения, что значительно снижает экономические показатели асинхронного ЭП.

Первые схемы, в которых использовалась энергия потерь в цепи ротора, создавались путем специального соединения АД с другими электрическими машинами, поэтому эти схемы получили название каскадных. В настоящее время существуют схемы, использующие энергию скольжения АД не посредством добавочных электрических машин, а с помощью полупроводниковых приборов и трансформаторов, однако эти схемы также называют каскадными.

В общем случае каскадными называют такие схемы включения АД, которые, обеспечивая регулирование его скорости, позволяют одновременно использовать энергию потерь. По способу использования этой энергии различают схемы электромеханического и электрического машинно-вентильных каскадов.

В электромеханическом машинно-вентильном каскаде (рис. 5.31, а) обмотка ротора АД 2, приводящего в движение рабочую машину 1, подключается к трехфазному неуправляемому выпрямителю 4, собранному на полупроводниковых вентилях. К выводам выпрямителя присоединен якорь вспомогательной машины постоянного тока 3, ЭДС которой  $E_{в.м}$  направлена навстречу ЭДС выпрямителя  $E_B$ . АД 2 и машина 3 соединены одним валом. Рассмотрим баланс мощности в этой схеме.

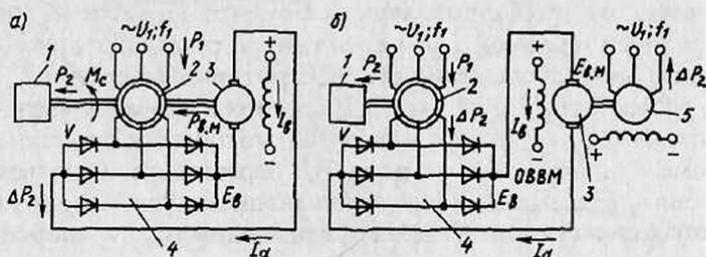


Рис. 5.31

Поступающая из сети мощность  $P_1$  за вычетом потерь в статоре АД 2 передается на ротор. Большая часть этой мощности, называемая электромагнитной и определяемая выражением  $P_{эм} = M\omega_0$ , в виде полезной механической мощности  $P_2 = M\omega$  передается рабочей машине 1. Оставшаяся часть, определяющая мощность потерь скольжения  $\Delta P_2 = M\omega_0 s$ , за вычетом потерь в цепях ротора АД 2, выпрямителя 4 и вспомогательной машины 3, с помощью последней преобразуется в механическую мощность и возвращается на вал рабочей машины 1.

Если пренебречь потерями в схеме, то можно установить, что рабочей машине 1 передается вся электромагнитная мощность  $P_{эм}$ . Действительно, на приводной вал рабочей машины от АД 2 поступает мощность  $P_2 = M\omega$ , а от вспомогательной машины 3 — мощность  $P_{в.м} = \Delta P_2 = M\omega_0 s$ , в результате суммарная механическая мощность на валу рабочей машины  $P_{р.м} = P_2 + P_{в.м} = M\omega + M\omega_0 s = M\omega_0 = P_{эм}$ .

В электрическом машинно-вентильном каскаде (см. рис. 5.31, б) в отличие от электромеханического вспомогательная машина 3 не имеет механической связи с АД 2, а соединена одним валом с синхронным генератором 5, подключенным к сети переменного тока, т. е. энергия потерь передается не на вал рабочей машины 1, а отдается в сеть, рабочей же машине передается только механическая мощность  $P_2 = M\omega$ .

Рассмотрим принцип регулирования скорости в каскадных схемах, которое осуществляется изменением ЭДС вспомогательной машины 3 в результате воздействия на ток возбуждения этой машины.

Предположим, что при работе ЭП в установившемся режиме происходит увеличение тока возбуждения  $I_b$ , что влечет за собой увеличение ЭДС  $E_{в.м.}$ , а следовательно, уменьшение выпрямленного тока, определяемого выражением

$$I_d = (E_b - E_{в.м.}) / R_c, \quad (5.35)$$

где  $R_c$  – суммарное активное сопротивление цепи выпрямленного тока;  $E_b$  – ЭДС выпрямителя 4.

Уменьшение  $I_d$  и тем самым тока ротора АД вызовет снижение его момента, который станет меньше момента нагрузки  $M_c$ , создаваемого рабочей машиной 1. В результате скорость двигателя начнет снижаться, а его скольжение  $s$  и ЭДС роторной обмотки  $E_2 = E_{2к} s$  начнут возрастать. Увеличение ЭДС ротора приведет к увеличению тока ротора и тем самым момента АД, который вновь станет равным моменту нагрузки, и скорость АД перестанет изменяться. Двигатель опять будет работать в установившемся режиме, но уже при более низкой скорости. В случае уменьшения тока  $I_b$  скорость АД будет возрастать.

Из рассмотрения механических характеристик электромеханического каскада (рис. 5.32, а) для разных значений токов  $I \dots 4$  (соответственно  $I_b = (0; 0,2; 0,4; 1,0) I_{б.ном.}$ ) видно, что максимальный момент по мере снижения скорости каскада возрастает, поскольку по мере увеличения тока возбуждения вспомогательной машины ее момент также возрастает. При этом максимальная механическая мощность каскада, определяемая произведением максимального момента на соответствующую этому моменту скорость, при разных токах возбуждения вспомогательной машины примерно одинакова. Поэтому электромеханический каскад называют каскадом постоянной мощности.

При токе возбуждения вспомогательной машины, близком к нулю, механическая характеристика электрического каскада (см. рис. 5.32, б) близка к естественной характеристике АД. По мере увеличения тока

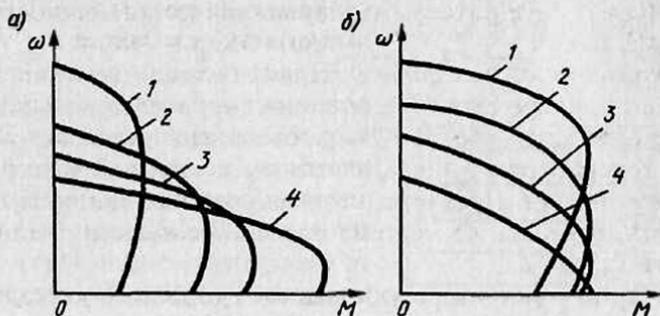


Рис. 5.32

возбуждения искусственные характеристики 2...4 располагаются ниже естественной 1, причем номинальному току возбуждения  $I_{в.ном}$  соответствует самая нижняя характеристика. Максимальный момент каскада, определяемый только АД 2 (см. рис. 5.31), сохраняется на разных характеристиках примерно постоянным. Поэтому электрический каскад называют каскадом постоянного момента.

В настоящее время в связи с широким распространением силовых тиристорных преобразователей появилась возможность заменять ими электромашинные вращающиеся преобразователи. В частности, электромашинный агрегат 3...5 (см. рис. 5.31, б) представляет собой преобразователь энергии постоянного тока, поступающей от выпрямителя 4, в энергию переменного тока, отдаваемую в сеть. Такой машинный агрегат может быть заменен на статический преобразователь частоты, состоящий из трансформатора 2 и инвертора 3 (рис. 5.33). В этой схеме к обмотке ротора АД 1 подключены неуправляемый выпрямитель 5 и инвертор 3, а также реактор 4, который служит для сглаживания пульсации выпрямленного тока. Асинхронный ЭП с такой схемой получил название асинхронного вентильного каскада.

Инвертор, как уже отмечалось, представляет собой преобразователь энергии постоянного тока в энергию переменного тока. Электродвижущую силу инвертора можно регулировать аналогично ЭДС машины постоянного тока. Поэтому механические характеристики асинхронного вентильного каскада аналогичны характеристикам вентильно-машинного электрического каскада.

Существует много схем асинхронных вентильных каскадов, аналогичных рассмотренной. Эти схемы отличаются по своей сложности, техническим возможностям регулирования скорости, энергетическим показателям и др. Однако принцип действия и назначение их аналогичны: использование энергии скольжения для совершения полезной работы и обеспечение возможности плавного регулирования скорости АД.

Отметим основные показатели регулирования скорости АД в каскадных схемах включения.

Практический диапазон регулирования скорости в каскадных схемах обычно не превышает 2. Объясняется это тем, что по мере роста диапазона регулирования скорости и тем самым скольжения АД требуется увеличивать установленную мощность всех устройств в его роторной цепи. Так, при диапазоне регулирования, равном двум, установленная

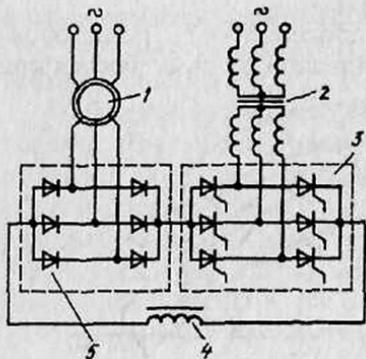


Рис. 5.33

мощность машинно-вентильного электрического каскада составляет 250% от номинальной мощности АД, из которых на собственно АД приходится 100%, а на выпрямитель, вспомогательную машину и синхронный генератор – по 50%.

Плавность регулирования скорости АД в каскадных схемах высокая и определяется плавностью изменения ЭДС вспомогательной машины или ПЧ. Регулирование скорости производится вниз от естественной характеристики, хотя некоторые специальные каскадные схемы обеспечивают и двухзонное регулирование.

Несмотря на значительные капитальные затраты при реализации данного способа регулирования скорости, применение каскадных схем за счет использования энергии скольжения для полезной работы оказывается экономически целесообразным для мощных асинхронных ЭП с небольшим диапазоном регулирования скорости. Это ЭП мощных вентиляторов, центробежных насосов, компрессоров, воздуходувок, испытательных установок.

## 5.9. ИМПУЛЬСНЫЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Развитие полупроводниковой техники активизировало применение импульсного регулирования координат АД. Сущность его заключается в периодическом (импульсном) изменении параметров цепей АД или питающей сети. Применительно к асинхронному ЭП чаще всего осуществляется импульсное изменение подводимого к АД напряжения или сопротивлений резисторов в цепях ротора или статора. Эти способы применяются главным образом для регулирования скорости, хотя при необходимости они позволяют регулировать (ограничивать) ток и момент АД.

Для импульсного регулирования сопротивления  $R_{2z}$  резисторов  $3$  (рис. 5.34, а) в цепи ротора АД  $1$  параллельно им включаются кон-

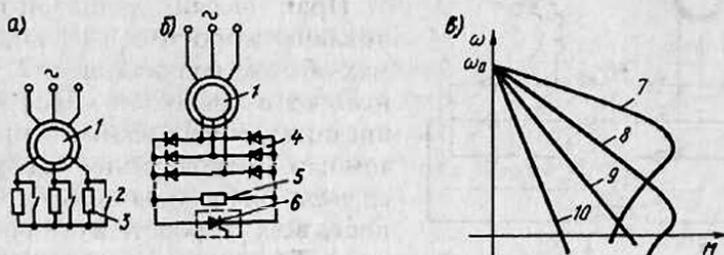


Рис. 5.34

такты 2 управляемого ключа (например, электромагнитного или тиристорного контактора), работающего с изменяемым заполнением (скважностью)  $0 < \gamma < 1$ . Принцип действия такой схемы аналогичен схеме с использованием ДПТ.

Аналогично работает и схема импульсного регулирования сопротивления резистора 5, включенного в цепь выпрямленного тока ротора АД 1 с выпрямителями 4. Шунтирование резистора 5 осуществляется с помощью тиристорного ключа 6, который также работает с управляемым заполнением  $\gamma$ .

Используя рассмотренные схемы можно получить семейство искусственных механических характеристик АД при различных значениях  $\gamma$  (см. рис. 5.34, а). Проанализируем характеристики 7 и 10, построенные для граничных режимов работы управляемого ключа соответственно при  $\gamma = 1$  и  $\gamma = 0$ . При  $\gamma = 1$  (ключ 2 постоянно замкнут или тиристор 6 постоянно открыт) резистор закорочен и АД работает по естественной механической характеристике 7. При  $\gamma = 0$  (ключ 2 постоянно разомкнут или тиристор 6 постоянно закрыт) резистор полностью введен в цепь ротора и АД работает по искусственной характеристике 10. При промежуточных значениях заполнения  $0 < \gamma < 1$  эквивалентное сопротивление резистора в цепи ротора изменяется в соответствии с формулой  $R_{2, экв} = (1 - \gamma)R_{2, н}$  и искусственные характеристики 8 и 9 располагаются между граничными.

Таким же образом можно получить характеристики АД при импульсном регулировании сопротивления  $R_{1, н}$  добавочных резисторов в цепи статора. Включение управляемых ключей параллельно резисторам в схеме, приведенной на рис. 5.1, б, и их работа с переменным заполнением  $\gamma$  обеспечивает получение искусственных электромеханических и механических характеристик АД в виде кривых, показанных на рис. 5.6.

Импульсное регулирование напряжения на статоре АД может быть реализовано с помощью тиристорного регулятора напряжения. В этом случае реализуются искусственные механические характеристики, аналогичные изображенным на рис. 5.9.

Для улучшения показателей регулирования координат АД импульсным способом создаются замкнутые ЭП с использованием различных обратных связей. В результате автоматического регулирования  $\gamma$  механические характеристики АД (рис. 5.35) становятся жесткими. Схема, позволяющая получить такие характеристики, рассмотрена в гл. 11.

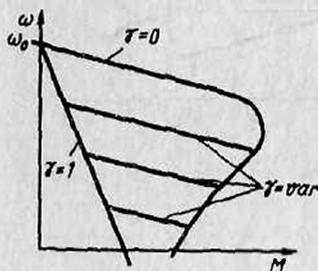


Рис. 5.35

Использование импульсных способов позволяет в ряде случаев осуществлять регулирование координат ЭП с помощью более простых схем управления.

## 5.10. ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Торможение АД можно осуществить при питании его от сети переменного тока путем подключения цепи статора к источнику постоянного тока (динамическое торможение), а также при его самовозбуждении.

При включении АД по основной схеме (см. рис. 5.1, а) возможно торможение противовключением и рекуперативное торможение.

Торможение противовключением осуществляется двумя путями. Один из них связан с изменением чередования на статоре двух фаз питающего АД напряжения. Допустим, например, что АД работает по механической характеристике 1 в точке *a* (рис. 5.36, а) при чередовании на статоре фаз напряжения сети *ABC*. Тогда при переключении двух фаз (например, *B* и *C*) АД переходит на работу по характеристике 3 в точке *d*, участок *db* которой соответствует торможению противовключением. Отметим, что при реализации торможения для ограничения тока и момента АД производится включение добавочных резисторов в цепь ротора или статора.

Другой путь перевода АД в режим торможения противовключением может быть использован при активном характере момента нагрузки  $M_c$ . Допустим, что требуется осуществить спуск груза, обеспечивая его торможение с помощью АД (так называемый тормозной спуск груза). Для этого АД включается на подъем с большим добавочным сопротивлением  $R_{2д}$  в цепи ротора (кривая 2). Вследствие превышения моментом нагрузки  $M_c$  пускового момента дви-

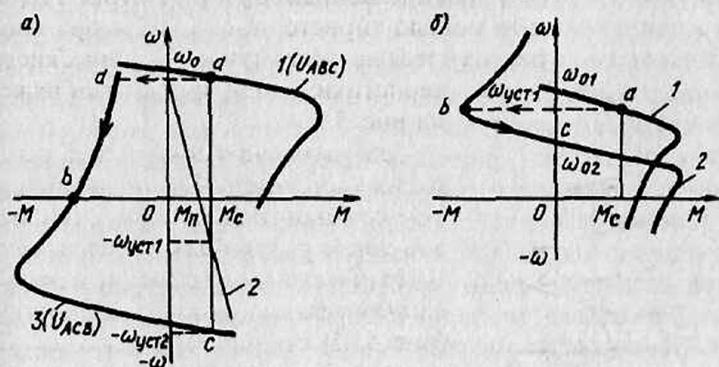


Рис. 5.36

гателя  $M_n$  и его активного характера груз начнет опускаться с установившейся скоростью  $-\omega_{уст1}$ . АД при этом будет работать в режиме торможения противовключением.

**Рекуперативное торможение** осуществляется в том случае, когда скорость АД превышает синхронную  $\omega_0$  и он работает в генераторном режиме параллельно с сетью. Такой режим возникает, например, при переходе двухскоростного АД с высокой скорости на низкую, как это показано на рис. 5.36, б. Предположим, что в исходном положении АД работал по характеристике 1 в точке  $a$ , вращаясь со скоростью  $\omega_{уст1}$ . При увеличении числа пар полюсов АД переходит на работу по характеристике 2 в точке  $b$ , участок  $bc$  которой соответствует торможению с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть.

Этот же вид торможения может быть реализован в системе «преобразователь частоты – двигатель» при останове АД или его переходе с характеристики на характеристику. Для этого осуществляется уменьшение частоты выходного напряжения ПЧ, а значит, и синхронной скорости  $\omega_0$ . В силу механической инерции текущая скорость АД  $\omega$  будет изменяться медленнее, чем скорость вращения магнитного поля  $\omega_0$ , т. е. будет постоянно ее превышать. За счет этого и возникает режим торможения с отдачей энергии в сеть. Отметим, что ПЧ должен быть способен при этом передать энергию от двигателя в сеть.

Рекуперативное торможение также может быть реализовано в ЭП грузоподъемных механизмов при спуске грузов. Для этого АД включается в направлении спуска груза (характеристика 3 на рис. 5.36, а). После окончания разбега он будет работать в точке  $c$  со скоростью  $-\omega_{уст2}$ . При этом осуществляется процесс спуска груза с отдачей энергии в сеть.

Рекуперативное торможение является наиболее экономичным видом торможения АД.

**Для динамического торможения** обмотку статора АД отключают от сети переменного тока и подключают к источнику постоянного тока, как это показано на рис. 5.37. Обмотка ротора АД 1 при этом может быть закорочена или в ее цепь включаются добавочные резисторы 3 с сопротивлением  $R_{2д}$ .

Постоянный ток  $I_n$ , значение которого может регулироваться резистором 2, протекает по обмоткам статора и создает неподвижное в пространстве магнитное поле (возбуждает АД). При вращении ротора в нем наводится ЭДС, под действием которой в обмотке протекает ток, создающий магнитный поток, также неподвижный в пространстве. Взаимодействие тока ротора с результирующим магнитным полем АД создает тормозной момент, за счет которого достигается эффект торможения. Двигатель в этом случае работает в режиме генератора независимо от сети переменного тока, преобразовывая ки-

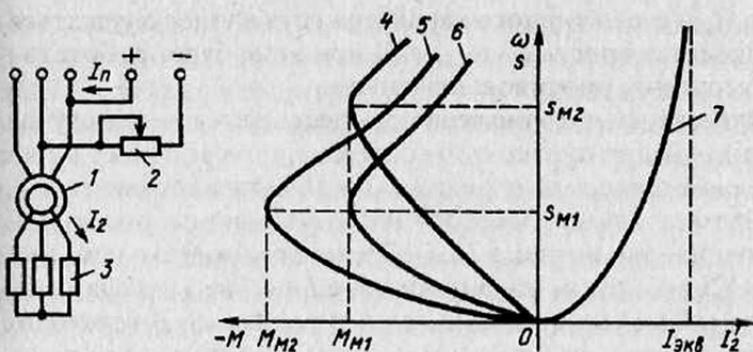


Рис. 5.37

нетическую энергию движущихся частей ЭП и рабочей машины в электрическую, которая рассеивается в виде тепла в цепи ротора.

Формулы для характеристик АД в режиме динамического торможения выводятся на основании анализа его схемы замещения. Опуская вывод формул, представим графически электромеханическую  $I_2'(s)$  (кривая 7) и механические  $M(s)$  кривые 4...6 характеристики АД.

Характеристика  $I_2'(s)$  расположена на рисунке в первом квадранте, где  $s = \omega/\omega_0$  – скольжение АД в режиме динамического торможения. Механические характеристики АД расположены во втором квадранте.

Различные искусственные механические характеристики АД в режиме динамического торможения можно получить, изменяя сопротивление  $R_{2л}$  добавочных резисторов 3 в цепи ротора или постоянный ток  $I_n$ , подаваемый в обмотки статора. На рисунке показаны механические характеристики АД для различных сочетаний  $I_n$  и  $R_{2л}$ . Характеристика 6 соответствует току  $I_{n1}$  и сопротивлению резистора  $R_{2л1}$ , максимальный момент на ней равен  $M_{M1}$ , а скольжение, ему соответствующее,  $-s_{M1}$ . Увеличение сопротивления резисторов 3  $R_{2л2} > R_{2л1}$  при  $I_n = \text{const}$  не приводит к изменению максимального момента, в то время как максимальное скольжение  $s_M$  при этом пропорционально возрастает, что видно из характеристики 4.

Увеличение тока  $I_n$  ( $I_{n2} > I_{n1}$ ) при  $R_{2л} = \text{const}$  вызывает увеличение максимального момента пропорционально квадрату тока. Характеристика двигателя в этом случае имеет вид кривой 5. Варьируя значения  $I_n$  и  $R_{2л}$ , можно получить желаемый вид механических характеристик АД в режиме динамического торможения и тем самым соответствующую интенсивность торможения асинхронного ЭП.

**Торможение при самовозбуждении** основано на том, что после отключения АД от сети его электромагнитное поле затухает (исчезает не мгновенно) в течение некоторого, пусть и небольшого интер-

вала времени. За счет энергии этого затухающего поля и использования специальных схем включения АД можно обеспечить его самовозбуждение и реализовать тормозной режим. На практике применение нашли так называемые конденсаторное и магнитное торможение АД.

При конденсаторном торможении, схема которого приведена на рис. 5.38, а, возбуждение АД 1 осуществляется с помощью конденсаторов 2, подключаемых к статору. Отметим, что конденсаторы могут подключаться к статору постоянно (глухое подключение) или с помощью дополнительного контактора, будучи при этом соединенными в схему треугольника или звезды.

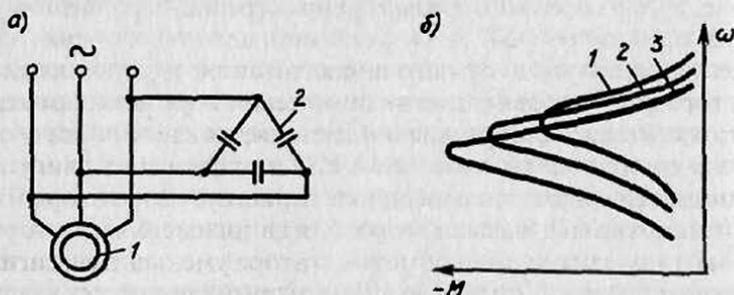


Рис. 5.38

Определяющим фактором, от которого зависят вид и расположение характеристик АД 1...3 (см. рис. 5.38, б), а значит, интенсивность торможения, является емкость конденсаторов  $C$  (кривые 1...3 соответствуют значениям  $C_1 < C_2 < C_3$ ). Чем она больше, тем больше будет максимум тормозного момента, а характеристики будут смещаться в область низких скоростей АД.

Магнитное торможение, общая схема которого показана на рис. 5.39, а, реализуется после отключения статора двигателя 2 от сети и замыкания с помощью контактов 1 его выводов накоротко. За счет запасенной в двигателе электромагнитной энергии происходит самовозбуждение двигателя и на его валу создается тормоз-

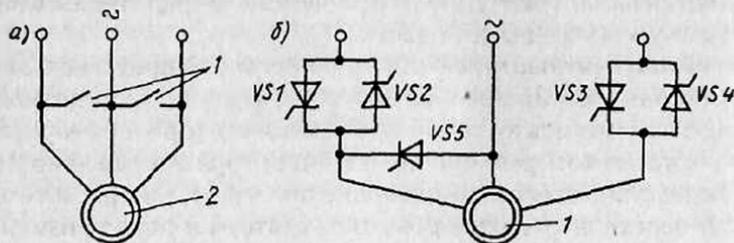


Рис. 5.39

ной момент. Особенностью такого торможения является быстротечность, определяемая небольшим временем затухания магнитного поля двигателя, однако возникающие тормозные моменты достаточно велики и обеспечивают интенсивное торможение ЭП.

Практические возможности торможения АД существенно расширило использование тиристорных регуляторов напряжения, которые позволяют осуществлять как пуск двигателя, так и его торможение. Для обеспечения интенсивного торможения двигателя часто используется комбинированный способ, например динамическое торможение в сочетании с торможением коротким замыканием. Этот способ может быть реализован тиристорным устройством (см. рис. 5.39, б), состоящим из двух пар встречно-параллельно включенных тиристоров  $VS1...VS4$ , служащих для подключения или отключения двигателя  $I$  от источника питания, и дополнительного тиристора  $VS5$  для реализации торможения коротким замыканием обмоток статора. Торможение осуществляется следующим образом. После закрытия тиристоров  $VS1...VS4$  и отключения двигателя от сети подается сигнал управления на тиристор  $VS5$ , который замыкает накоротко две фазы статора. Когда интенсивность торможения коротким замыканием обмоток статора уменьшится, сигнал управления подается на тиристор  $VS1$ , который пропускает в цепь статора выпрямленный ток и тем самым обеспечивает режим динамического торможения.

Выпускаемые серийно тиристорные пускорегулирующие устройства обеспечивают и другие варианты торможения АД, а также так называемый безударный его пуск, при котором снижаются броски электромагнитного момента (см. разд. 5.11).

## 5.11. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ И ИХ ФОРМИРОВАНИЕ

В общем случае в асинхронном ЭП возникают электромагнитный переходный процесс, определяемый электромагнитной инерционностью обмоток АД, и механический, определяемый инерцией элементов механической части ЭП.

**Электромагнитные переходные процессы.** АД представляет собой электромеханический преобразователь энергии с несколькими магнитосвязанными между собой обмотками статора и ротора, взаимное положение которых при вращении ротора непрерывно изменяется. Вследствие этого возникающие при пуске, реверсе и торможении АД переходные токи в обмотках статора и ротора изменяются по сложным колебательным зависимостям, а определяемый ими электромагнитный момент имеет колебательный характер и явля-

ется сложной функцией времени. Для примера на рис. 5.40, а приведены экспериментальные графики изменения во времени скорости 1 и момента 2 АД при пуске, а на рис. 5.40, б для сравнения – соответственно расчетные графики, построенные по статической механической характеристике. Нетрудно отметить их существенное различие.

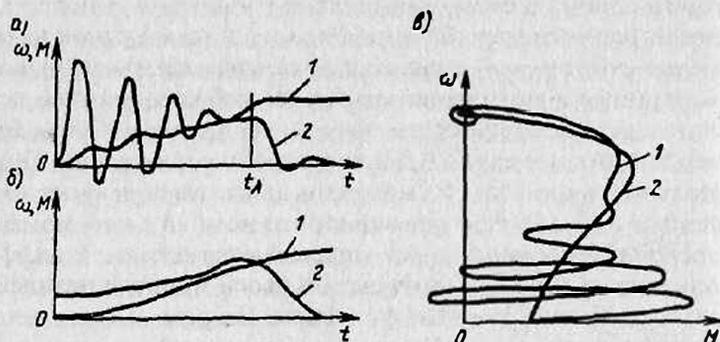


Рис. 5.40

Сложный характер имеет и так называемая динамическая механическая характеристика  $1 \omega(M)$  АД, для построения которой берутся значения его момента и скорости в одни и те же моменты времени переходного процесса (см. рис. 5.40, в). Она резко отличается от статической механической характеристики 2 того же АД, полученной расчетом по формуле (5.11). Различие между этими характеристиками обусловлено протеканием переходных электромагнитных процессов в АД. Момент двигателя в переходном режиме может в несколько раз превосходить момент в статическом режиме из-за того, что переходные токи статора и ротора могут быть значительно выше значений, рассчитанных по формулам для статического режима. Магнитные поля, образуемые переходными составляющими токов, могут либо усиливать, либо ослаблять основное поле, создаваемое принужденными (установившимися) составляющими токов, определяя соответствующее усиление или ослабление переходного электромагнитного момента. Иногда момент может стать даже отрицательным (тормозным), что можно видеть на начальном участке кривой 1.

Существенное различие характеристик 1 и 2 определяется также и тем, что динамическая характеристика АД зависит не только от параметров его обмоток, но и от момента нагрузки и момента инерции ЭП. Кроме того, характер переходного электромагнитного момента АД зависит от вида переходного процесса (пуск, реверс, торможение), а также от начального уровня магнитного поля дви-

гателя. Анализ этих зависимостей позволяет отметить, что при большом суммарном моменте инерции и моменте нагрузки кривая момента АД в начале переходного процесса имеет много пиков, затухание которых происходит медленно. При малых моментах инерции и нагрузки наблюдается обратная картина.

Большое влияние на характер переходных процессов при реверсе и торможении АД оказывает оставшееся магнитное поле, так как при отключении двигателя от сети его магнитный поток не может мгновенно снизиться до нуля. Как показывают расчеты и эксперименты, наличие этого потока оказывает неблагоприятное воздействие на переходные процессы и вызывает увеличение максимальных переходных моментов АД при реверсе и торможении. Пики переходных электромагнитных моментов двигателя при пуске в 3...5, а при реверсе в 12...18 раз превышают его номинальный момент.

Переходные процессы в АД описываются системой дифференциальных уравнений [21], которые по своей природе нелинейны и содержат периодические коэффициенты. Их решение для нахождения зависимостей  $\omega(t)$  и  $M(t)$  целесообразно производить с помощью ЭВМ.

**Механические переходные процессы** в асинхронном ЭП описываются основным уравнением механического движения (2.16), в котором моменты АД  $M(\omega)$  и исполнительного органа  $M_c(\omega)$  в общем случае являются нелинейными функциями скорости (скольжения). Получение искомых зависимостей  $s(t)$ ,  $\omega(t)$  и  $M(t)$  рассмотрено в разд. 2.7.

**Переходные процессы в системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ–АД)**, схема которой приведена на рис. 5.41, могут быть сформированы близкими по своему характеру к переходным процессам в системе УВ – ДПТНВ (см. разд. 4.8). Для этого

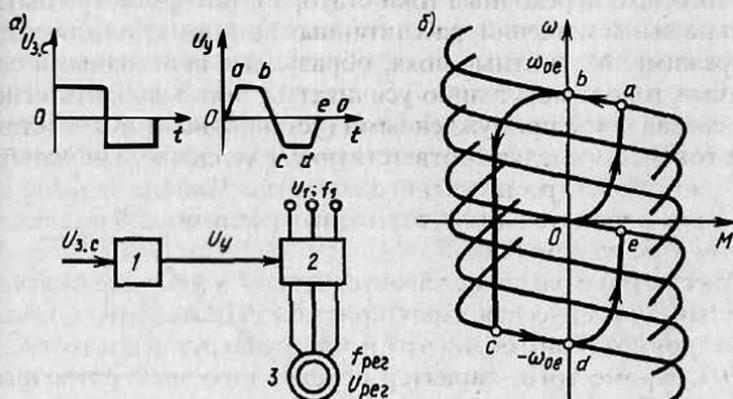


Рис. 5.41

используется задатчик интенсивности  $I$ , который при поступлении сигнала задания  $U_{з.с}$  формирует нужный закон изменения сигнала управления  $U_y(t)$  на входе ПЧ 2 и позволяет за счет этого получить требуемые графики изменения скорости и момента АД 3 в переходном процессе. Необходимо отметить, что реализуемое при этом плавное изменение частоты и подаваемого на АД напряжения обуславливает частичное или полное устранение влияния электромагнитных переходных процессов.

Для примера на рис. 5.41, б показана на плоскости механических характеристик траектория пуска, реверса и торможения вхолостую АД при линейном законе изменения частоты, а следовательно, скорости магнитного поля двигателя  $\omega_0(t)$ . Пуску АД соответствует участок  $0ab$ , реверсу – участок  $bcd$  и торможению – участок  $de0$  этой траектории. Отметим, что при торможении АД (за исключением участка  $0e$ ) происходит рекуперация (отдача) энергии в сеть, что экономически целесообразно.

Для построения кривых переходного процесса  $\omega(t)$  и  $M(t)$  можно использовать формулы из разд. 4.8 для системы «преобразователь – двигатель», считая при этом, что работа АД происходит на линейных участках его механических характеристик.

**Формирование переходных процессов в системе «регулятор напряжения – АД».** Как уже отмечалось выше, для переходных процессов в асинхронном ЭП в общем случае характерны значительные по амплитуде пики электромагнитного момента, что обуславливает дополнительные динамические усилия в его механической части и может даже вызвать поломку ее элементов. В тех случаях, когда нежелательно или недопустимо воздействие переходного электромагнитного момента на кинематическую схему ЭП, часто прибегают к формированию момента АД с помощью тиристорных регуляторов напряжения (ТРН). За счет плавного увеличения подводимого к АД напряжения при определенной последовательности подключения его фазных обмоток к сети обеспечивается эффект снижения пиков электромагнитного момента АД. На рис. 5.42, а показано изменение момента  $1$  и скорости  $2$  АД в процессе пуска при скачкообразном, а на рис. 5.42, б при экспоненциальном характере изменения

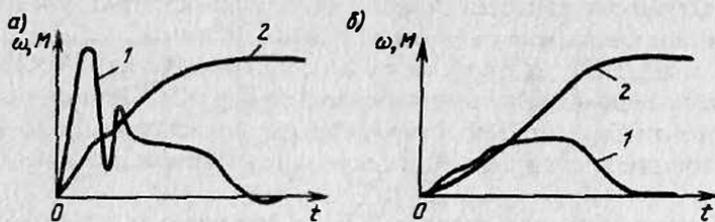


Рис. 5.42

прикладываемого к АД напряжения. Если в первом случае максимум момента примерно в два раза превосходит критический момент АД, то во втором случае при нарастании напряжения по экспоненте с постоянной времени около 0,025 с колебательный характер электромагнитного момента практически не проявляется. Скорость изменения прикладываемого к АД напряжения может изменяться также и по любому другому закону, например линейному.

Использование ТРН позволяет решить и еще одну важную практическую задачу – обеспечить регулирование (ограничение) пусковых токов АД, необходимость в чем возникает при пуске двигателей большой (несколько сотен или тысяч кВт) мощности. При прямом (без токоограничения) пуске мощных двигателей возникающие при этом значительные пусковые токи приводят к снижению напряжения в питающей сети, что отрицательно влияет на работу других электроприемников и приводит к значительным электромагнитным, механическим и тепловым перегрузкам элементов самого ЭП. Плавное изменение прикладываемого к АД при его пуске напряжения позволяет существенно снизить эти отрицательные явления. ТРН, которые предназначены для формирования желаемых графиков момента и тока АД в переходных процессах, получили название пускателей, или «мягких» стартеров.

## 5.12. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ОДНОФАЗНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

В том случае, когда источником электроэнергии является однофазная сеть переменного тока, что имеет место в жилых и административных городских и сельских зданиях, применяются ЭП с однофазными АД. Эти двигатели выпускаются, как правило, на небольшую мощность (до 10 кВт) и используются в приводах стиральных машин, холодильников, медицинских аппаратов, пылесосов, доильных аппаратов, центрифуг, небольших обрабатывающих станков и др.

Разновидностью однофазных АД являются так называемые исполнительные двигатели, которые применяются в различных устройствах автоматического управления и характеризуются возможностью широкого регулирования скорости.

Промышленность выпускает однофазные АД серий АОЛБ мощностью от 18 до 400 Вт на напряжения 127, 220 и 380 В и номинальные скорости от 1370 до 2900 об/мин; АВЕ мощностью от 10 до 400 Вт; УАД мощностью от 1 до 70 Вт в однофазном режиме и некоторые другие.

Отметим, что однофазные АД по сравнению с трехфазными обычно имеют несколько худшие технические характеристики и

удельные показатели. Так, мощность однофазного АД составляет не более 70% от мощности трехфазного АД тех же габаритных размеров. Однофазные АД, кроме того, имеют и более низкую перегрузочную способность.

**Схема включения и характеристики однофазного АД.** Однофазные АД имеют на статоре две обмотки – основную (рабочую) и пусковую. Ротор однофазного АД выполняется короткозамкнутым в виде беличьей клетки. Рассмотрим сначала работу однофазного АД, схема включения которого приведена на рис. 5.43, а, в режиме, когда пусковая обмотка отключена.

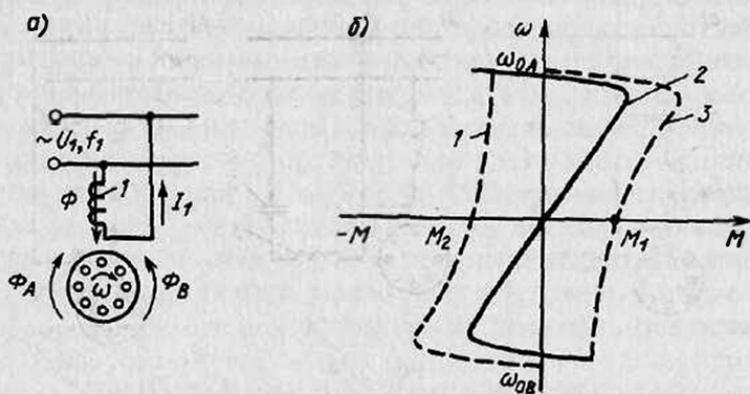


Рис. 5.43

Рабочая обмотка 1 двигателя подключается к однофазной сети переменного тока с напряжением  $U_1$  и частотой  $f_1$ . Однофазный ток  $I_1$  этой обмотки создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на два поля  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$ , имеющие равные амплитуды и вращающиеся в противоположные стороны с одинаковой скоростью  $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ . Этим магнитным полям соответствуют механические характеристики  $\omega(M_A) - 3$  и  $\omega(M_B) - 1$ , показанные на рис. 5.43, б. Результирующая характеристика двигателя  $\omega(M) - 2$  получается алгебраическим суммированием моментов  $M_A$  и  $M_B$  при одной и той же скорости. Эта характеристика напоминает механическую характеристику трехфазного АД, за исключением точки короткого замыкания. При неподвижном роторе ( $\omega = 0, s = 1$ ) магнитные поля  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$  создают одинаковые по значению, но противоположные по знаку моменты  $M_1$  и  $M_2$ , поэтому при пуске результирующий момент ( $M_{II} = M_1 - M_2$ ) равен нулю и двигатель не может прийти во вращение даже при отсутствии момента нагрузки на его валу. Пуск однофазного АД обеспечивает дополнительная пусковая обмотка, которая при подключении двигателя к сети позволяет получить вращающееся магнитное поле, а следовательно, определенный пусковой момент.

Разновидности однофазных АД. Как известно из теории электрических машин, для получения вращающегося магнитного поля на статоре двигателя должны быть расположены как минимум две обмотки, смещенные в пространстве на определенный угол и обтекаемые переменными токами со сдвинутыми во времени максимумами. В соответствии с этим пусковая обмотка укладывается на статоре двигателя со смещением ее оси на  $90^\circ$  по отношению к оси рабочей обмотки, а сдвиг токов обеспечивается включением в ее цепь дополнительного фазосдвигающего элемента (сопротивления). На рис. 5.44 показаны три схемы включения однофазных АД.

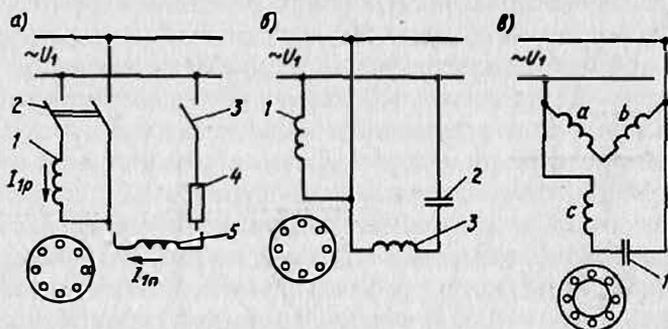


Рис. 5.44

На рис. 5.44, *a* рабочая 1 и пусковая 5 обмотки подключаются к однофазной сети переменного тока с напряжением  $U_1$ . Для сдвига фазы тока  $I_{1п}$  относительно тока  $I_p$  в цепь пусковой обмотки включается фазосдвигающий элемент 4 с сопротивлением  $z_n$ , в качестве которого могут быть использованы активный резистор, катушка индуктивности или конденсатор. Благодаря наличию такого сдвига при пуске АД образуется вращающееся магнитное поле и он будет развивать определенный пусковой момент.

Порядок пуска АД следующий. Сначала замыкаются ключи 2 и 3, подключающие обе обмотки к сети, и АД начинает разгоняться. При определенной скорости с помощью ключа 3, который может управляться автоматически с помощью реле времени, токовым реле или центробежным регулятором, пусковая обмотка отключается от сети и двигатель продолжает работать только с рабочей обмоткой.

Наиболее благоприятные характеристики однофазный АД имеет при использовании в качестве фазосдвигающего элемента конденсатора. Если емкость этого конденсатора подобрать таким образом, чтобы ток пусковой обмотки при неподвижном роторе был сдвинут относительно тока рабочей обмотки на угол в  $90^\circ$ , то АД при трогании с места будет иметь круговое вращающееся магнитное поле и сможет развивать значительный пусковой момент.

Пусковая обмотка с конденсатором может и не отключаться после окончания пуска АД и при его работе в основном режиме. В этом случае она уже будет не вспомогательной, а второй рабочей обмоткой. Такой двигатель называется конденсаторным (см. рис. 5.44, б) и имеет существенно лучшие технические показатели, нежели АД с пусковой обмоткой. По существу конденсаторный АД представляет собой двухфазный АД с обмотками 1 и 3, который посредством конденсатора 2 подключается к однофазной сети.

В качестве однофазных АД могут быть при необходимости использованы и обычные трехфазные АД с короткозамкнутыми роторами. Одна из возможных схем такого включения трехфазного АД приведена на рис. 5.44, в, где обмотки фаз *a* и *b* статора соединены последовательно и подключены напрямую к питающей сети, а обмотка фазы *c* подключена к той же сети через конденсатор 1. Существуют и другие схемы соединения обмоток трехфазного АД при его подключении к однофазной сети, но во всех этих случаях он приобретает свойства и характеристики однофазного АД.

Разновидностью однофазного АД является двигатель с экранированными полюсами. Такой АД имеет на статоре явно выраженные полюсы с однофазной рабочей обмоткой. Часть каждого полюсного наконечника охвачена (экранирована) короткозамкнутым витком. Такое исполнение двигателя обеспечивает при протекании тока по его рабочей обмотке возникновение магнитного поля, приближающегося по своему характеру к вращающемуся, благодаря чему и создается определенный пусковой момент.

Отдельную группу однофазных АД составляют исполнительные двигатели, которые имеют на статоре две обмотки (рис. 5.45, а) – возбуждения 1 и управления 3. Первая из них постоянно подключена к сети и обеспечивает возбуждение исполнительного АД. Вторая обмотка питается от специального блока управления 2, с помощью которого может регулироваться амплитуда подводимого к ней

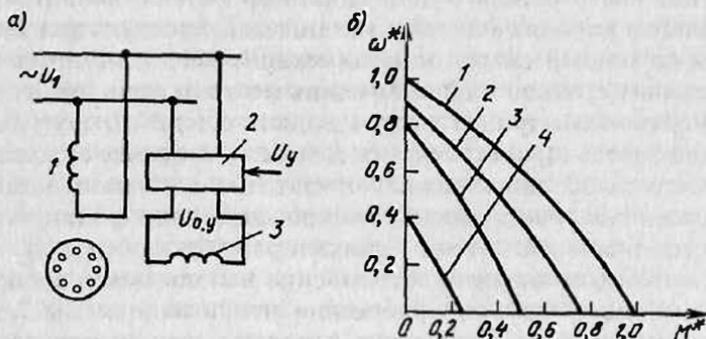


Рис. 5.45

напряжения  $U_{оу}$ , или его фаза относительно напряжения возбуждения  $U_1$ , или и то и другое. В первом случае говорят об амплитудном управлении исполнительным АД, во втором – о фазовом и в третьем – о смешанном. Изменение амплитуды или фазы напряжения  $U_{оу}$  осуществляется по внешнему сигналу управления  $U_y$ . Механические характеристики 1...4 исполнительного АД при амплитудном управлении, построенные в относительных единицах (за базовые приняты номинальные значения скорости и момента), приведены на рис. 5.45, б (соответственно при  $U_y/U_{уном} = 1; 0,75; 0,5$  и  $0,25$ ).

Разновидностью исполнительных АД являются малоинерционные двигатели, у которых ротор имеет меньшую массу, а следовательно, пониженный момент инерции. Применение нашли АД с полым немагнитным и полым ферромагнитным роторами.

АД с полым немагнитным ротором имеют два выполненных из обычной электротехнической стали статора – внешний и внутренний. Между ними располагается ротор, представляющий собой тонкостенный (до 1 мм) цилиндр из алюминиевого сплава. Двухфазная обмотка обычно располагается на внешнем статоре.

Ферромагнитный ротор малоинерционных АД выполняется в виде полого цилиндра. Такая конструкция ротора обуславливается тем, что магнитный поток при работе АД проходит только по небольшому поверхностному слою ротора, т. е металл внутри него не используется и может быть без ущерба удален.

Пример использования исполнительного однофазного АД в следящем ЭП рассмотрен в гл. 9.

### 5.13. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ЛИНЕЙНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

В подавляющем большинстве асинхронных ЭП применяются двигатели вращательного движения, при использовании которых для привода рабочих машин и механизмов с поступательным движением исполнительных органов (механизмов подачи металлообрабатывающих станков и передвижения мостовых кранов, кузнечно-прессовых машин, транспортеров, задвижек и др.) требуются механические передачи, обеспечивающие преобразование вращающегося движения вала двигателя в поступательное. К таким механическим передачам относятся кривошипно-шатунный механизм, передача шестерня – рейка, винт – гайка и ряд других.

Естественным выглядит стремление использовать в таких ЭП двигатели поступательного движения, что позволило бы отказаться от применения механических передач и тем самым повысить технические и экономические показатели работы привода и техно-

логического оборудования. Поэтому были разработаны линейные двигатели постоянного и переменного тока, в частности асинхронные (ЛАД).

Представление об устройстве такого двигателя можно получить, если мысленно разрезать вдоль по образующей статор и ротор АД вращательного движения и развернуть их в плоскость, как это показано на рис. 5.46, а. Принцип действия ЛАД аналогичен принципу действия вращающегося АД. При подключении обмотки 4 статора 3 к сети переменного тока она создает магнитное поле, поступательно движущееся с линейной скоростью  $v = 2\tau f_1$ , где  $f_1$  — частота питающего напряжения,  $\tau$  — длина полюсного деления статора. Это линейно перемещающееся магнитное поле наводит в обмотке 1 ротора 2 ЭДС, под действием которой в ней начинает протекать ток. Взаимодействие этого тока с магнитным полем и создает на роторе (его называют вторичным элементом) тяговое усилие, которое и приводит его в движение.

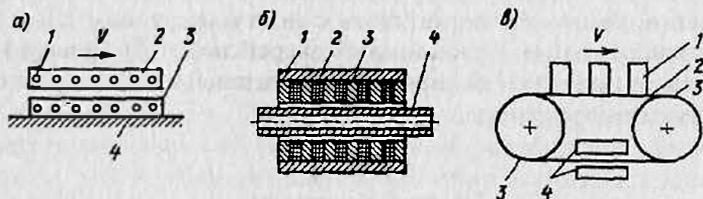


Рис. 5.46

Вторичный элемент ЛАД может быть длиннее или короче статора (первичного элемента), с обмоткой и без нее, плоской или цилиндрической формы. Рассмотрим для примера конструкцию трубчатого ЛАД (см. рис. 5.46, б), статор которого выполнен в виде цилиндра 1, внутри которого расположены катушки 2, образующие его обмотку, и металлические шайбы 3, являющиеся частью магнитопровода. Внутри статора помещается подвижный вторичный элемент 4 также трубчатой формы, выполненный из ферромагнитного материала.

Плоский вторичный элемент без обмотки выполняется в виде листа, полосы или рельса, которые могут помещаться между двумя статорами (ЛАД с двусторонним статором) или статором и ферромагнитным сердечником (ЛАД с односторонним статором и сердечником). Принцип действия ЛАД с вторичным элементом в виде полосы аналогичен принципу действия обычного АД с массивным ферромагнитным ротором.

ЛАД могут работать и в обратном режиме, когда вторичный элемент неподвижен, а перемещается статор. Такие ЛАД обычно

применяются на транспорте, когда в качестве вторичного элемента используется рельс (или специальная полоса), а статор размещается на самом подвижном транспортном средстве.

Регулирование координат ЛАД, как и обычного вращающегося двигателя, осуществляется с помощью резисторов, изменением частоты и подводимого напряжения, а торможение может быть динамическое или противовключением.

Рассмотрим пример использования ЛАД для привода конвейера (см. рис. 5.46, в), предназначенного для перемещения изделий 1 с помощью металлической ленты 2, укрепленной на барабанах 3. Лента 2 проходит между двух статоров ЛАД 4, являясь его вторичным элементом. Применение ЛАД в этом случае позволяет повысить скорость движения ленты, устранить ее проскальзывание, отказаться от механической передачи. Установка нескольких ЛАД позволяет создавать длинные конвейеры, что затруднительно при использовании традиционного ЭП с вращающимся АД.

Применение ЛАД целесообразно для привода кузнечно-прессовых машин, задвижек и клапанов с поступательным движением штока, ткацких станков, механизмов дверей лифта. Отдельную большую область применения линейных двигателей представляет собой электрический транспорт.

### Контрольные вопросы

1. Какие серии АД выпускаются электротехнической промышленностью?
2. Что такое схема замещения АД?
3. В каких энергетических режимах может работать АД?
4. Какими способами можно получить искусственные механические характеристики АД?
5. Какие достоинства и недостатки имеет способ регулирования координат АД с помощью резисторов?
6. Какие возможности по управлению АД обеспечивает регулирование напряжения на его статоре?
7. В чем состоит принцип регулирования экономичности АД?
8. Почему при частотном способе регулирования происходит также и изменение подводимого к АД напряжения?
9. Какие типы ПЧ вы знаете?
10. Поясните принцип действия ПЧ с непосредственной связью.
11. Поясните принцип действия управляемых инверторов и назовите основные их виды.
12. За счет чего в частотно-управляемом асинхронном ЭП производится регулирование подводимого к АД напряжения?
13. Поясните принцип получения различного числа пар полюсов многоскоростного АД.
14. Каковы причины появления каскадных схем включения АД?

15. Назовите виды каскадных схем и поясните принцип регулирования скорости АД в этих схемах.
16. В чем сущность импульсного способа регулирования координат ЭП с АД?
17. Для чего служат замкнутые ЭП с импульсным регулированием?
18. Какими способами осуществляется торможение АД в его основной схеме включения?
19. Что такое динамическое торможение АД?
20. В чем основная особенность переходных процессов в асинхронном ЭП?
21. Какими путями достигается формирование переходных процессов в асинхронном ЭП?
22. Каковы области использования однофазных АД?
23. В чем состоят основные особенности работы однофазного АД?
24. Назовите основные виды однофазных АД.
25. Что такое линейный АД и каковы рациональные области его применения?

## Глава 6. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Синхронные трехфазные двигатели (СД) широко применяются в ЭП самых разнообразных рабочих машин и механизмов, что объясняется их высокими технико-экономическими показателями. СД имеют высокий коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , близкий к единице или даже опережающий. Способность СД работать с опережающим  $\cos \varphi$  и отдавать при этом в сеть реактивную мощность позволяет улучшать режим работы и экономичность системы электроснабжения. КПД современных СД составляет 96...98%, что на 1...1,5% выше КПД АД с теми же габаритными размерами и скоростью. В синхронных двигателях возможно регулирование перегрузочной способности посредством регулирования тока возбуждения, причем она меньше зависит от напряжения сети, чем в АД. Синхронный двигатель обладает абсолютно жесткой механической характеристикой. Важным преимуществом конструкции СД является наличие большого воздушного зазора, вследствие чего его характеристики и свойства мало зависят от износа подшипников и неточности монтажа ротора.

Электротехническая промышленность выпускает несколько серий СД различного назначения. Для общего применения выпускаются двигатели серий СД2 и СД3 мощностью от 132 до 1000 кВт, СДН-2 и СДН-3 мощностью от 315 до 4000 кВт и напряжением питания 380 и 6000 В. В приводе вертикальных насосов используются двигатели ВДС и ВДС2 мощностью от 4000 до 12 500 кВт и ВСДН мощностью от 630 до 3200 кВт. Существуют и СД во взрывоопасном исполнении серий СДКП2 (315... 5000 кВт) и СТДП (630... 12 500 кВт). Кроме того, выпускаются СД, предназначенные для привода быстроходных ме-

ханизмов (серия СТД), мельниц (СДМЗ и СДСЗ-2), поршневых компрессоров (СДК2) и ряд других.

### 6.1. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ, СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Статор СД, схема включения которого приведена на рис. 6.1, а, выполняется аналогично статору асинхронного двигателя с трехфазной обмоткой, подключаемой к сети переменного тока. Ротор СД имеет обмотки возбуждения и пусковую короткозамкнутую в виде беличьей клетки. Конструктивно ротор СД может быть явнополюсным и неявнополюсным в виде цилиндра. В качестве источника для питания обмотки возбуждения чаще всего используется генератор постоянного тока 2 небольшой мощности (0,3...3% от мощности СД), называемый возбудителем, который устанавливается на одном валу с двигателем 1. Регулирование тока возбуждения двигателя  $I_{в.д}$  осуществляется изменением с помощью резистора 3 тока  $I_{в.в}$  возбуждения возбудителя 4. Отметим, что в современных схемах автоматического регулирования возбуждения (АРВ) СД широко применяются тиристорные управляемые выпрямители (тиристорные возбудители).

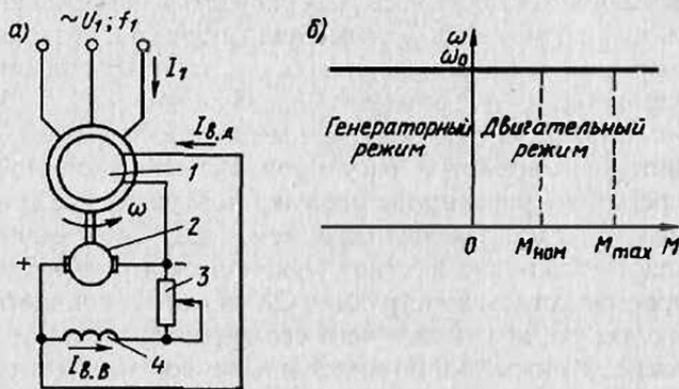


Рис. 6.1

Вращающий момент СД обусловлен взаимодействием вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, и магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения или постоянными магнитами на роторе. Взаимодействие этих полей может создать постоянный по направлению вращающий момент СД только в том случае, когда ротор будет вращаться со скоростью магнитно-

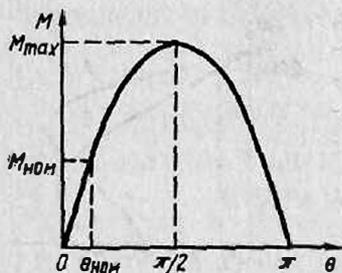


Рис. 6.2

Для определения максимального момента нагрузки  $M_{\max}$ , до которого сохраняется синхронная работа двигателя с сетью, служит угловая характеристика СД (рис. 6.2). Она отражает зависимость момента  $M$  от угла сдвига  $\theta$  между векторами ЭДС статора  $E$  и фазного напряжения сети  $U_{\phi}$ .

Момент СД представляет собой синусоидальную функцию угла  $\theta$ :

$$M = 3U_{\phi} E \sin \theta / (\omega_0 x_1) = M_{\max} \sin \theta, \quad (6.1)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное значение напряжения сети;  $E$  – ЭДС в обмотке статора СД;  $x_1$  – индуктивное сопротивление фазы обмотки СД;  $\omega_0$  – скорость вращения магнитного поля.

Максимального значения момент СД достигает при  $\theta = \pi/2$ . Угол сдвига характеризует собой перегрузочную способность СД: при больших значениях  $\theta$  двигатель выпадает из синхронизма, при небольших – его работа устойчива. Номинальные значения угла  $\theta_{\text{ном}}$  составляют обычно  $25 \dots 30^\circ$ , им соответствует номинальный момент  $M_{\text{ном}}$ , и кратность максимального момента в этом случае  $\lambda_{\text{н}} = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 2 \dots 2,5$ .

СД может работать во всех основных энергетических режимах: двигательном и генераторном, с сетью и независимо от сети.

## 6.2. ПУСК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При неподвижном роторе и подключении обмотки статора к сети переменного тока и обмотки возбуждения к источнику постоянного тока из-за постоянно изменяющихся взаимных направлений магнитных полей статора и ротора СД будет развивать не постоянный по направлению, а знакопеременный вращающий момент, а следовательно, не сможет разогнаться до синхронной скорости  $\omega_0$  без применения специальных мер по его запуску.

Один из способов пуска, который в настоящее время находит ограниченное применение, связан с использованием небольшого по

мощности вспомогательного двигателя, устанавливаемого на валу СД. С помощью этого двигателя ротор ненагруженного СД разгоняется до синхронной скорости, после чего осуществляется его синхронизация с сетью. В системах «СД – генератор постоянного тока» в качестве вспомогательного двигателя может использоваться генератор, работающий в период пуска в двигательном режиме.

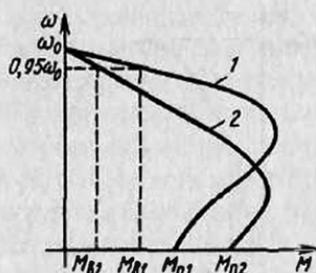


Рис. 6.3

Наибольшее же распространение получил другой способ пуска СД, называемый асинхронным. Для его реализации на роторе СД укладывается дополнительная пусковая обмотка, выполняемая аналогично короткозамкнутой обмотке АД типа беличьей клетки. В этом случае при подключении СД к сети переменного тока происходит его разбег аналогично АД. При подсинхронной скорости СД, отличающейся от синхронной на несколько процентов, ток подается в обмотку возбуждения двигателя и он втягивается в синхронизм с сетью.

В зависимости от своих параметров пусковая обмотка СД обеспечивает два основных вида механической пусковой характеристики (рис. 6.3). Характеристика 1 обеспечивает более высокий синхронизирующий (входной) момент  $M_{н1}$  по сравнению с характеристикой 2, но меньший начальный (пусковой) момент  $M_{н1} < M_{н2}$ . Выбор вида пусковой характеристики СД определяется конкретными условиями его работы.

При пуске СД используются две основные схемы его возбуждения. При использовании схемы с подключением возбудителя в конце пуска, приведенной на рис. 6.4, на первом этапе пуска контакт б разомкнут, а контакт 4 замкнут. Обмотка возбуждения 2 двигателя 1 оказывается замкнутой на резистор 3 и асинхронный пуск происходит в благоприятных условиях. В конце пуска при достижении подсинхронной скорости по команде специального реле управления, в качестве которого могут быть использованы реле частоты, тока или времени, контакт 4 размыкается, а контакт б замыкается. В результате в обмотку возбуждения 2 подается ток от возбудителя 8 и СД втягивается в синхронизм. Регулирование тока возбуждения осуществляется резистором 5 в цепи обмотки возбуждения 7 возбудителя.

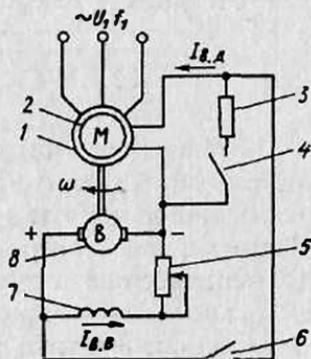


Рис. 6.4

Вторая схема возбуждения СД (см. рис. 6.1, а), более простая, получила название схемы с постоянно (глухо) подключенным возбудителем. В этой схеме обмотка возбуждения с самого начала пуска постоянно подключена к возбудителю 2. При скорости  $\omega \approx 0,7\omega_0$  происходит самовозбуждение возбудителя и в обмотку возбуждения СД подается ток возбуждения, благодаря чему при достижении подсинхронной скорости двигатель втягивается в синхронизм.

Пуск по схеме рис. 6.1, а происходит в менее благоприятных условиях, так как пусковой момент СД оказывается ниже, чем при использовании схемы рис. 6.4, что затрудняет его синхронизацию. Поэтому эта схема применяется при относительно легких условиях пуска СД, когда момент нагрузки на его валу не превосходит 50% его номинального момента, а инерционные массы ЭП и исполнительного органа невелики. При более трудных условиях возбудитель подключается в конце пуска.

Пуск СД может происходить с ограничением пускового тока или без него. В большинстве случаев СД мощностью до нескольких сотен киловатт (а иногда и более) при наличии мощной питающей сети запускаются прямым подключением к сети без ограничения тока. Кратность пускового тока по отношению к номинальному при прямом пуске составляет обычно 4...5.

При пуске СД большей мощности (несколько тысяч киловатт), соизмеримой с мощностью питающей сети, возникает необходимость ограничения пусковых токов, что достигается чаще всего использованием добавочных резисторов, реакторов или автотрансформаторов.

Замыкая выключатель 1 в схеме с реактором (рис. 6.5, а), при отключенном выключателе 2 осуществляют пуск СД 4 с реактором 3 в цепи статора, обеспечивающим снижение пускового тока до допустимого уровня. При достижении СД подсинхронной скорости

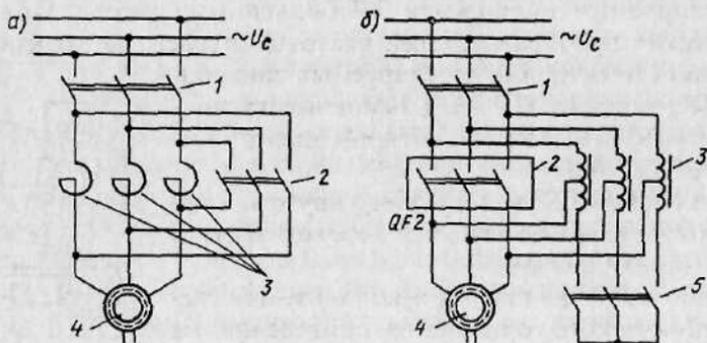


Рис. 6.5

замыкают выключатель 2, который шунтирует реактор, и двигатель оказывается подключенным к сети. Автоматизация пуска осуществляется обычно в функции времени. В некоторых схемах вместо реактора применяются более дешевые активные резисторы.

В случае использования автотрансформатора 3 (см. рис. 6.5, б) при пуске замыкают выключатели 1 и 5 и к СД 4 подводится пониженное напряжение. При достижении им подсинхронной скорости отключается выключатель 5, замыкается выключатель 2 и СД подключается непосредственно к выводам питающей сети.

При использовании автотрансформатора пусковой ток снижается пропорционально квадрату отношения напряжений СД и сети  $(U_d/U_c)^2$ , а при использовании реакторов или резисторов – пропорционально этому отношению. Однако автотрансформаторный способ пуска является более сложным, дорогим и менее надежным по сравнению с реакторным (резисторным) и применяется реже.

Практические схемы пуска СД рассмотрены в гл. 10.

Отметим, что при питании СД от преобразователя частоты может быть реализован так называемый частотный пуск, обеспечивающий с помощью специального задатчика такой темп изменения частоты питающего СД напряжения (а следовательно, и скорости вращения его магнитного поля), при котором ротор «успевает» за полем и двигатель работает синхронно с источником питания уже с самых малых своих скоростей. Для такого способа пуска характерны к тому же и меньшие потери энергии в двигателе при пуске.

### 6.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ И ТОРМОЖЕНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Основной областью применения СД до недавнего времени были нерегулируемые по скорости ЭП большой мощности. Появление статических преобразователей частоты определило практические возможности создания регулируемых синхронных ЭП по системе ПЧ – СД, основные принципы построения и свойства которой аналогичны системе ПЧ – АД.

Торможение СД, как и любого другого электродвигателя, осуществляется переводом его в генераторный режим.

Наиболее часто при этом используется схема динамического торможения, приведенная на рис. 6.6 (генераторный режим при работе СД независимо от сети переменного тока). В этой

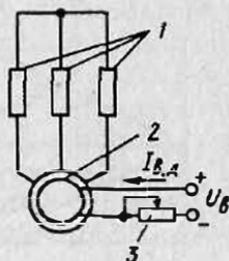


Рис. 6.6

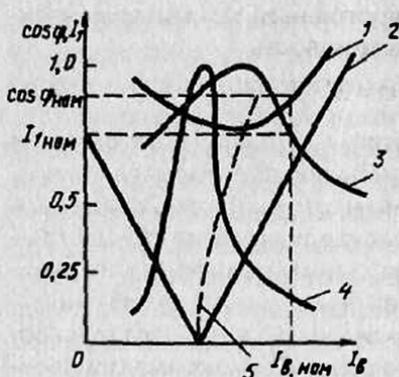


Рис. 6.7

схеме обмотки статора СД 2 отключаются от сети переменного тока и закорачиваются на добавочные резисторы 1 (или накоротко), а обмотка возбуждения остается подключенной к источнику возбуждения  $U_{\phi}$  через резистор 3.

Торможение противовключением СД используется редко, так как перевод СД в этот режим сопровождается значительными бросками тока и момента, требует токоограничения и применения сложных схем управления.

и применения сложных схем управления.

#### 6.4. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ КАК КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Возможность работы СД в качестве источника (компенсатора) реактивной мощности иллюстрируют так называемые U-образные характеристики (рис. 6.7), представляющие собой зависимости тока статора двигателя  $I_1$  и его  $\cos \varphi$  от тока возбуждения  $I_{\phi}$  при постоянных напряжении, частоте и мощности  $U_{\phi} = \text{const}$ ,  $f_1 = \text{const}$  и  $P_1 = \text{const}$ .

Минимуму зависимости  $I_1(I_{\phi})$  соответствует максимум коэффициента мощности  $\cos \varphi = 1$ , что можно объяснить с помощью фрагмента векторной диаграммы синхронного двигателя (рис. 6.8), показывающего расположение векторов напряжения сети  $\dot{U}_{\phi}$ , тока статора  $\dot{I}_1$ , его активной  $\dot{I}_{1a}$  и реактивной  $\dot{I}_{1p}$  составляющих при различных токах возбуждения СД.

При небольших токах возбуждения ток статора  $\dot{I}_1$  отстает от напряжения  $\dot{U}_{\phi}$  на угол  $\varphi$ , что соответствует работе СД с отстающим  $\cos \varphi$  и потреблению им реактивной энергии из питающей сети, так как активная составляющая полного тока  $I_{1a} = I_1 \cos \varphi$  совпадает по направлению с вектором напряжения сети  $\dot{U}_{\phi}$ , а реактивная составляющая  $\dot{I}_{1p}$  отстает от него на  $90^\circ$ .

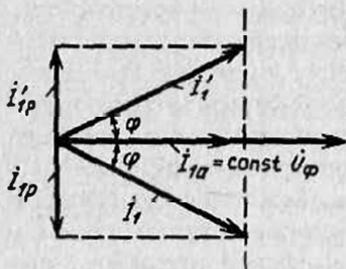


Рис. 6.8

Допустим, что СД работает при постоянной механической нагрузке и потребляет из сети активную мощность

$$P_1 = 3U_\phi I_1 \cos \varphi = 3U_\phi I_{1a}. \quad (6.2)$$

Из (6.2) следует, что при  $P_1 = \text{const}$   $I_1 = \text{const}$ . Поэтому при увеличении тока возбуждения СД конец вектора полного тока  $I_1$  будет перемещаться вверх до штриховой вертикальной линии, что означает уменьшение реактивной составляющей тока. При некотором токе возбуждения, близком к номинальному, реактивная составляющая тока станет равной нулю, т.е. ток статора будет чисто активным  $I_1 = I_{1a}$ . Этому режиму и будут соответствовать точки минимумов кривых 1, 2 на рис. 6.7 и максимально возможное значение  $\cos \varphi = 1$ .

При дальнейшем увеличении тока возбуждения СД вновь появится реактивная составляющая тока  $I_{1p}$ , но уже опережающая напряжение сети на  $90^\circ$ . За счет этого ток статора будет также опережать напряжение сети и СД начнет работать с опережающим  $\cos \varphi$ , отдавая реактивную энергию в питающую сеть.

На рис. 6.7 показаны зависимости  $I_1(I_a)$  – кривые 1, 2 и  $\cos \varphi(I_a)$  – кривые 3, 4 при номинальной нагрузке СД  $P_{\text{ном}}$  (1 и 3) и его холостом ходе (2 и 4). Область характеристик справа от штриховой линии 5 соответствует работе СД с опережающим  $\cos \varphi$ , слева от нее – с отстающим, на самой этой линии  $\cos \varphi = 1$ . Отметим, что СД без механической нагрузки на валу носит название компенсатора реактивной мощности и часто используется в этой функции в системах электроснабжения.

Как видно из рис. 6.7, с ростом мощности нагрузки область генерации реактивной мощности (опережающего  $\cos \varphi$ ) смещается в сторону больших токов возбуждения. Таким образом, если СД работает с переменной нагрузкой на валу, то для полного использования его компенсирующих свойств требуется соответствующее изменение тока возбуждения.

Регулирование тока возбуждения позволяет не только использовать СД как компенсатор реактивной мощности в системе электроснабжения, но и обеспечивать при необходимости устойчивость работы двигателя при колебаниях механической нагрузки; поддержание нормального напряжения в узле системы энергоснабжения, к которому присоединен двигатель; минимум потерь энергии в двигателе и системе энергоснабжения; регулирование  $\cos \varphi$  двигателя или в узле подключения его к системе энергоснабжения.

В общем случае регулирование тока возбуждения СД осуществляется системами автоматического регулирования возбуждения (АРВ), в которых используются тиристорные возбудители и различные виды обратных связей.

## 6.5. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Переходные процессы в ЭП с СД отличаются большим разнообразием и сложностью. Они возникают при пуске и торможении (останове) СД, при синхронизации его с сетью, увеличении (набросе) и снижении (сбросе) механической нагрузки, регулировании тока возбуждения, изменении напряжения питающей сети, вызываемом в том числе и короткими замыканиями в электрических сетях и линиях электропередач. Изучение этих переходных процессов представляет собой сложную задачу. Определяется это тем, что СД имеет несколько обмоток – статора, возбуждения и пусковую, обтекаемые перемен-

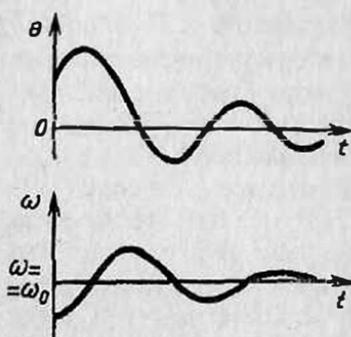


Рис. 6.9

На рис. 6.9 в качестве примера показаны графики колебательного затухающего переходного процесса при вхождении СД в синхронизм.

ным и постоянным токами, которые магнитно связаны друг с другом и в процессе работы двигателя непрерывно меняют положение относительно друг друга. Кроме того, во многих случаях необходимо учитывать и взаимодействие СД и питающей сети.

В общем случае переходные процессы в синхронном ЭП являются электро-механическими, т.е. процессы в электрической и механической частях ЭП связаны друг с другом и имеют, как правило, колебательный характер.

## 6.6. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Вентильным (ВД) называется синхронный двигатель с электронным коммутатором напряжения, к которому подключена обмотка статора, и датчиком положения ротора, установленным на валу двигателя и управляющим работой коммутатора в зависимости от положения ротора. Датчик положения ротора генерирует периодические сигналы, по которым открываются и закрываются ключи коммутатора, подключающего к сети соответствующие обмотки статора. В результате этого магнитное поле статора вращается с той же средней скоростью, что и ротор.

Рассмотрим принцип действия ВД (рис. 6.10), ротор 4 которого представляет собой постоянный магнит  $N - S$  с датчиком положения на валу 8. Коммутатор выполнен на четырех управляемых ключ-

тах 1, 2 и 6, 7 и связан с источником постоянного напряжения  $U$ . Обмотка статора СД на схеме для упрощения анализа представлена двумя проводниками 3 и 5. Рассмотрим работу схемы, предположив, что управляемые ключи могут открываться и закрываться по сигналам с датчика 8 в любой требуемой последовательности и на любую длительность.

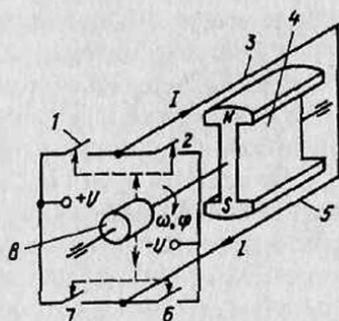


Рис. 6.10

Для протекания по проводникам 3 и 5 тока  $I$  в указанном направлении должны быть замкнуты ключи 1 и 6. В результате взаимодействия магнитного поля ротора с током  $I$  в проводниках 3 и 5 на ротор будет действовать вращающий момент, поворачивающий его в соответствии с правилом левой руки по часовой стрелке. После поворота ротора на  $180^\circ$  (на половину оборота) для сохранения прежнего направления вращающего момента на валу двигателя направление тока в проводниках 3 и 5 необходимо изменить на противоположное. Для этого с датчика 8 поступает команда на размыкание ключей 1 и 6 и замыкание ключей 2 и 7. После поворота ротора еще на  $180^\circ$  по сигналу с датчика 8 замыкаются ключи 1 и 6 и размыкаются ключи 2 и 7 и т. д. Таким образом, по сигналам с датчика положения ротора 8 с помощью управляемых ключей происходит коммутация тока в обмотке статора, чем обеспечивается постоянное направление вращающего момента двигателя при любой скорости его вращения.

Нетрудно заметить, что ВД по принципу своего действия аналогичен двигателю постоянного тока, у которого обмотка возбуждения (или постоянные магниты) находится на роторе (вращающейся части). Преимущество ВД при этом состоит в том, что у него нет механического коллекторно-щеточного узла и поэтому он является полностью бесконтактным при возбуждении от постоянных магнитов или имеет два контактных кольца при использовании обмотки возбуждения.

Совпадение принципов действия двигателя постоянного тока и ВД определяет схожесть их механических характеристик.

На статоре ВД располагается трехфазная обмотка переменного тока, питаемая от вентильного коммутатора. Ротор, обеспечивающий возбуждение двигателя, может быть выполнен в виде постоянного магнита или с обмоткой возбуждения, питаемой от источника постоянного тока через контактные кольца и щетки.

Двигатели с возбуждением от постоянных магнитов и мощностью до 30 кВт обычно многополюсные. В этом диапазоне мощнос-

ти двигатели с постоянными магнитами имеют меньшие габаритные размеры и массу и более высокий КПД по сравнению с двигателями, имеющими обмотку возбуждения.

В ВД средней и большой мощности обычно используются СД с обмоткой возбуждения, расположенной на роторе.

В последнее время ВД мощностью от 30 до 200 кВт стали исполняться бесконтактными с обмоткой возбуждения, специальным образом располагаемой на статоре вместе с трехфазной обмоткой. Ротор в этом случае представляет собой безобмоточное зубчатое колесо (зубчатку), через которое замыкается магнитный поток, создаваемый обмотками возбуждения и переменного тока. Вращается он синхронно с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой. Обмотка возбуждения в этом случае усиливает магнитный поток и тем самым увеличивает вращающий момент двигателя.

Коммутатор в схеме ВД представляет по принципу своего действия управляемый инвертор, который может питаться непосредственно от источника постоянного тока (сети постоянного тока, аккумуляторной батареи) или от управляемого выпрямителя, если двигатель подключается к сети переменного тока. В этом случае коммутатор представляет собой преобразователь частоты со звеном постоянного тока, рассмотренный в разд. 5.6.

В тиристорных преобразователях частоты, используемых в ЭП с ВД, коммутация тока в вентилях может быть естественной или искусственной. Естественная коммутация тиристоров используется в тех случаях, когда нагрузка инвертора (трехфазная обмотка СД) содержит источник ЭДС той же частоты, что и выходное напряжение инвертора. При этом благодаря действию этой ЭДС осуществляется коммутация вентилях, получившая название естественной.

Естественная коммутация вентилях, позволяющая использовать простой по схеме инвертор, может быть осуществлена только при сравнительно большой ЭДС двигателя, когда его скорость не ниже 10% номинальной. В связи с этим пуск ВД затруднен и требуются специальные меры для устранения этого недостатка.

Инвертор с искусственной коммутацией вентилях – это преобразователь постоянного напряжения или тока в переменный с принудительной коммутацией вентилях, вследствие чего его работа практически не зависит от характера и режима нагрузки. Схема ВД с искусственной коммутацией, устраняющей возникающие при пуске трудности, характерные для инверторов с естественной коммутацией, представлена на рис. 6.11.

Регулирование скорости вентиляхного двигателя 4 может производиться за счет изменения напряжения на выходе выпрямителя 1 с помощью сигнала  $U_{\alpha}$  от блока его управления 7, изменения угла управления тиристорами автономного инвертора 3 (сигнал  $U_{\beta}$  с

выхода блока управления инвертором б) изменения тока возбуждения  $I_{в.м}$ . Уровень скорости в первых двух случаях определяется задающим сигналом  $U_{з.с}$ . Датчик положения ротора 5 обеспечивает посредством сигнала  $U_{\varphi}$ , пропорционального положению ротора двигателя, требуемую коммутацию тиристоров инвертора 3. Реактор 2, включенный между выпрямителем 1 и инвертором 3, выполняет роль фильтра.

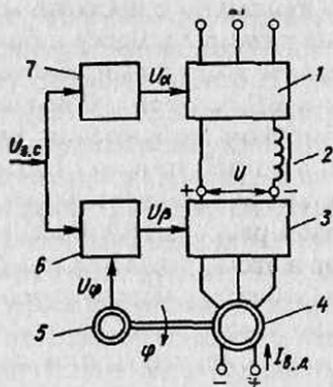


Рис. 6.11

Проблема пуска ВД не возникает также при использовании преобразователей частоты с непосредственной связью. В этих преобразователях коммутация вентилях осуществляется естественным путем при переходе сетевого напряжения через нуль. Однако, как отмечалось выше, преобразователи частоты с непосредственной связью обладают ограниченными регулировочными возможностями.

Для получения высокого качества регулирования координат в статических и динамических режимах в ЭП с ВД используются различные обратные связи.

Выпускаемые в настоящее время вентильные двигатели серий ЭПБ-1 и ЭПБ-2 предназначены для использования в электроприводах механизмов станков и роботов.

## 6.7. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Исполнительные органы некоторых рабочих машин и механизмов должны совершать строго дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце движения. В ЭП таких машин и механизмов успешно применяются шаговые двигатели (ШД) различных типов, образующие основу дискретного ЭП.

Широкое распространение дискретного ЭП определяется еще и тем обстоятельством, что он естественным образом сочетается с цифровыми управляющими машинами, программными устройствами и микропроцессорами, которые все шире применяются во всех отраслях техники. Например, дискретный ЭП используется для металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), роботов и манипуляторов, в гибком автоматизированном производстве, в электронной и часовой промышленности и др.

ЭП с ШД в настоящее время используются на мощности от долей ватта до нескольких киловатт, что определяется мощностью се-

рийно выпускаемых двигателей. Расширение шкалы мощности дискретных ЭП можно достигнуть используя серийные АД, которые за счет соответствующего управления могут работать в шаговом режиме.

Шаговый двигатель по принципу своего действия аналогичен синхронному, но в отличие от последнего магнитное поле ШД перемещается (вращается) не непрерывно, а дискретно, шагами. Это достигается за счет импульсного возбуждения обмоток ШД с помощью электронного коммутатора, который преобразует однофазную последовательность управляющих импульсов в многофазную систему напряжений, прикладываемых к его обмоткам (фазам).

Дискретному характеру напряжения на фазах ШД соответствует дискретное вращение (перемещение) электромагнитного поля в воздушном зазоре, вследствие чего движение ротора состоит из последовательных элементарных поворотов или шагов.

**Принцип действия и основные свойства шагового двигателя.** Принцип получения дискретного перемещения ротора рассмотрим на примере простейшей схемы двухфазного ШД (рис. 6.12, а).

ШД имеет на статоре две пары явно выраженных полюсов, на которых находятся обмотки возбуждения (управления): обмотка 4 с выводами 1Н – 1К и обмотка 3 с выводами 2Н – 2К. Каждая из

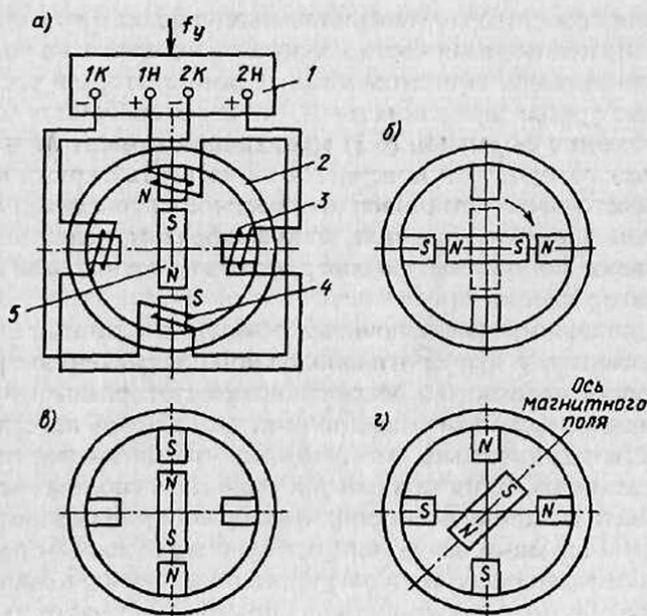


Рис. 6.12

обмоток состоит из двух частей, находящихся на противоположных полюсах статора 2. Ротором в рассматриваемой схеме является двухполюсный постоянный магнит 5.

Питание обмоток осуществляется импульсами напряжения, поступающими с устройства управления, которое преобразует одноканальную последовательность входных импульсов управления с частотой  $f_y$  в многоканальную по числу фаз ШД. Рассмотрим работу ШД, предположив, что в начальный момент времени напряжение подается на обмотку 4. Прохождение тока по этой обмотке вызывает появление магнитного поля статора 2 с вертикально расположенными полюсами  $N - S$ . В результате взаимодействия этого поля с постоянным магнитом (ротором) последний займет равновесное положение, в котором оси магнитных полей статора и ротора совпадают. Положение будет устойчивым, поскольку при отклонении от него на ротор будет действовать момент (синхронизирующий), стремящийся вернуть его в положение равновесия:

$$M = M_{\max} \sin \alpha, \quad (6.3)$$

где  $\alpha$  – угол между осями магнитных полей статора и ротора;  $M_{\max}$  – максимальный момент.

Допустим, что с помощью блока управления 1 напряжение снимается с обмотки 4 и подается на обмотку 3. В этом случае образуется магнитное поле статора с горизонтальными полюсами (см. рис. 6.12, б), т. е. магнитное поле дискретно совершило поворот на четверть окружности статора. При этом между осями статора и ротора появляется угол рассогласования  $\alpha = 90^\circ$  и на ротор будет действовать в соответствии с формулой (6.3) вращающий момент  $M = M_{\max}$ , под действием которого он повернется на четверть окружности статора и займет новое устойчивое равновесное положение, показанное сплошной линией на рисунке. Таким образом, вслед за шаговым перемещением поля статора совершит такое же шаговое перемещение и ротор двигателя.

Предположим, что отключилась обмотка 3 и питание вновь подается на обмотку 4, но с противоположной по сравнению с рис. 6.12, а полярностью напряжения. Магнитное поле статора опять будет иметь вертикально расположенные полюсы, но другой по сравнению с рис. 6.12, а полярностью. Это означает, что магнитное поле совершило еще один шаг на четверть окружности и снова на ротор будет действовать синхронизирующий момент, который повернет его в положение, показанное на рис. 6.12, в. Следующий шаг в том же направлении ротор совершит, если отключить обмотку 4 и подключить обмотку 3 с обратной полярностью напряжения. И наконец, ротор завершит полный оборот при снятии напряжения с обмотки 3 и подаче напряжения на обмотку 4.

Кроме рассмотренного способа симметричной коммутации обмоток двигателя, обеспечивающего шаговое перемещение ротора на  $90^\circ$ , существует способ коммутации, позволяющий при той же конструкции двигателя уменьшить шаг ротора вдвое.

Допустим, что исходное положение ШД соответствует схеме, показанной на рис. 6.12, а. Подключим обмотку 3 с полярностью, соответствующей положению магнитного поля на рис. 6.12, б, не отключая обмотку 4. При этом образуется вторая, горизонтальная система полюсов и действующее магнитное поле будет складываться из магнитных полей горизонтальных и вертикальных полюсов. Ось такого результирующего поля будет располагаться между полюсами с одинаковой полярностью, как это показано на рис. 6.12, г, т.е. ось магнитного поля совершит поворот на  $45^\circ$ . Ротор при таком порядке возбуждения обмоток ШД повернется тоже на  $45^\circ$ , а не на  $90^\circ$ , как было ранее.

Если теперь снять напряжение с обмотки 4, положение магнитного поля будет соответствовать рис. 6.12, б. Следующее перемещение магнитного поля и ротора на  $45^\circ$  совершится при возбуждении обмотки 4 без отключения обмотки 3 и т.д. Схема коммутации, при которой подключаются поочередно одна или две обмотки, называется несимметричной.

Угловое перемещение ШД в общем случае определяется выражением

$$\alpha = 2\pi / (pn), \quad (6.4)$$

где  $p$  – число пар полюсов ротора;  $n$  – число переключений (тактов) в цикле, равное числу фаз ШД при симметричной коммутации и удвоенному числу фаз при несимметричной.

Шаговое перемещение ротора соответствует последовательности управляющих импульсов, при этом каждому импульсу соответствует одно переключение обмотки ШД (один такт коммутации) и один шаг ротора. Суммарный угол поворота ШД пропорционален числу импульсов, а его скорость – частоте коммутации обмоток  $f_k$ :

$$\omega = \alpha f_k. \quad (6.5)$$

Для реверса ШД, например при симметричной схеме коммутации, необходимо изменить полярность напряжения обмотки, которая была отключена на данном такте коммутации. Тогда ротор ШД совершит шаг в противоположном направлении.

Основным режимом работы шагового привода является динамический. В отличие от СД ШД рассчитаны на вхождение в синхронизм из состояния покоя и принудительное электрическое торможение. Благодаря этому в шаговом ЭП проще обеспечиваются

пуск, торможение, реверс и переход с одной частоты управляющих импульсов на другую. Пуск ШД осуществляется скачкообразным или постепенным увеличением частоты входного сигнала от нуля до рабочей, торможение – снижением ее до нуля, а реверс – изменением последовательности коммутации обмоток ШД.

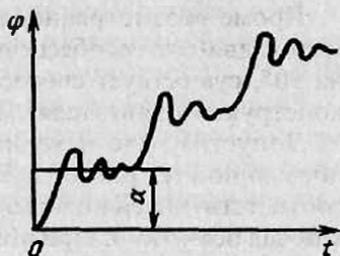


Рис. 6.13

На рис. 6.13 показан пример переходного процесса  $\varphi(t)$  в шаговом ЭП при отработке им трех импульсов управления, где  $\varphi$  – полный угол поворота вала ШД, а  $\alpha$  – единичный (единичный шаг). Из рисунка видно, что переходный процесс отработки заданного перемещения имеет колебательный характер.

Обеспечение заданного характера переходных процессов в ЭП с ШД является основной и наиболее сложной задачей, так как вследствие электромагнитной инерции обмоток двигателя, механической инерции его ротора и наличия момента нагрузки на валу при резких изменениях частоты следования импульсов управления ротор может не успеть отработать полностью все импульсы. Максимальная частота управляющих импульсов, при которой возможен пуск ШД из неподвижного состояния без выпадения из синхронизма (пропуска шагов), называется частотой приемистости. Чем выше электромагнитная и механическая инерция ШД и больше момент его нагрузки, тем меньше частота приемистости.

Современные ШД различны по конструктивному исполнению. В зависимости от числа фаз и устройства магнитной системы они бывают однофазными, двухфазными и многофазными с активным или пассивным ротором.

Активный ротор у ШД выполняется из постоянных магнитов или снабжается обмоткой возбуждения, как у обычных СД. Вследствие высокой экономичности и надежности в работе, технологичности изготовления, небольших габаритных размеров и массы широкое распространение получили ШД с ротором из постоянных магнитов, называемые магнитоэлектрическими (см. рис. 6.12). Обычно ШД с активным ротором из-за сложности его изготовления с малыми полюсными делениями имеют шаг от 15 до 90°. Для уменьшения шага в таких ШД увеличивают число фаз и тактов коммутации, а также используют двухстаторную или двухроторную конструкцию.

Скорости ШД с активным ротором составляют от 208 до 314 рад/с, частота приемистости от 70 до 500 Гц, номинальные вращающие моменты от  $10 \cdot 10^{-6}$  до  $10 \cdot 10^{-3}$  Н·м.

Выпускается несколько серий шаговых магнитоэлектрических двигателей: четырехфазные ШДА, двух- и четырехфазные ШД и ДШ-А, четырехфазные ШДА-3 и др.

При необходимости получения небольших единичных перемещений используются двигатели с пассивным ротором, которые делятся на реактивные и индукторные. Работа таких ШД основана на взаимодействии магнитного поля и ферромагнитного тела. Статор и ротор реактивного ШД имеют явно выраженные полюсы, называемые обычно зубцами. На зубцах статора размещаются обмотки возбуждения, питаемые от электронного коммутатора. Ротор выполняется из ферромагнитного материала и не имеет обмоток возбуждения, вследствие чего и называется пассивным.

Отличительная особенность реактивного ШД заключается в неравенстве числа зубцов статора  $z_c$  и ротора  $z_p$ , причем  $z_p > z_c$ . Вследствие такой конструкции при каждом переключении обмоток ротор совершает поворот (шаг), равный разности полюсных делений статора и ротора:

$$\alpha = \tau_c - \tau_p = 360^\circ / z_c - 360^\circ / z_p. \quad (6.6)$$

Уменьшая разность числа зубцов  $z_c$  и  $z_p$ , можно снизить шаг ротора. На практике эту разность выбирают четной, что улучшает использование ШД. Для уменьшения шага полюсы статора выполняют с несколькими зубцами.

Реактивные ШД при своей простоте и технологичности имеют существенный недостаток – незначительные мощность и синхронизирующий момент, что ограничивает их применение. Этот недостаток отсутствует в индукторных ШД, в которых для увеличения синхронизирующего момента ротор подмагничивается со стороны статора с помощью постоянных магнитов или дополнительной обмотки возбуждения.

Выпускается несколько серий ШД с пассивным ротором (Ш, ШДР, ШД, РШД), имеющих шаг от 1,5 до 9°, вращающие моменты от  $2,5 \cdot 10^{-6}$  до  $10 \cdot 10^{-3}$  Н·м и частоту приемистости от 250 до 1200 Гц.

Развитие дискретного электропривода привело к созданию специальных видов ШД – линейных, волновых, с малоинерционным и катящимся роторами.

На базе цилиндрических линейных ШД созданы двухкоординатные линейно-поворотные ШД, суммирующие на своем валу два независимых движения – вращательное и поступательное.

Важным достижением в области дискретного электропривода является создание так называемых многокоординатных ШД, осуществляющих перемещение исполнительных органов по трем координатам в пространстве. Двигатели такого рода, отличаясь вы-

сокими точностью позиционирования и скоростью, используются в приводах манипуляторов, роботов и автоматических линий станков.

**Схемы управления.** Управление ШД, как уже отмечалось, обеспечивается электронным блоком.

Современные блоки управления ШД состоят из нескольких функциональных узлов, выполняемых по различным схемам и с использованием разнообразных элементов. Стремление расширить область применения дискретного привода, повысить качество и точность его движения, а также надежность, упростить наладку и эксплуатацию отразилось в унификации схем управления ШД.

Рассмотрим обобщенную функциональную схему ЭП с ШД (рис. 6.14). Основная ее часть, обычно называемая разомкнутой схемой, выделена штриховой линией.

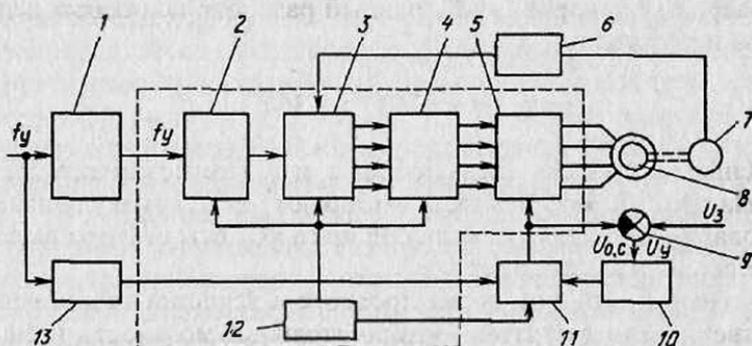


Рис. 6.14

Сигнал управления  $f_y$  в виде импульсов напряжения поступает на вход блока 2 от программного или другого внешнего командного устройства. Блок 2 видоизменяет эти импульсы, формируя их по длительности и амплитуде, как необходимо для нормальной работы последующих блоков схемы управления. Распределитель импульсов 3 преобразует последовательность сформированных импульсов, например в четырехфазную систему однополярных импульсов напряжения, соответствующую числу фаз (обмоток) двигателя.

Импульсы с выхода распределителя 3 усиливаются с помощью промежуточного усилителя 4 и поступают на коммутатор 5, питающий обмотки ШД 8. Обычно коммутатор питается от источника постоянного тока (выпрямителя) 12 и обеспечивает в обмотках ШД пульсирующий ток одного направления.

Рассмотренная разомкнутая схема управления ШД не всегда обеспечивает высокие динамические свойства, точность и энерге-

тические показатели ЭП. Поэтому современные схемы управления ШД содержат дополнительные узлы, с помощью которых характеристики ЭП улучшаются. К таким узлам относятся частотно-импульсный регулятор напряжения 11, усилитель обратной связи по току 10, блок электронного дробления шага 13, блок плавного разгона и торможения (задатчик интенсивности) 1, датчик положения ротора и скорости 7 и цифровой регулятор 6.

Регулятор 11 и усилитель 10, связанные с узлом сравнения 9, служат для автоматической стабилизации тока в обмотках ШД и поддержания его момента, что существенно улучшает энергетические показатели работы двигателя. Стабилизация тока осуществляется введением отрицательной обратной связи по току, с помощью которой за счет регулирования частоты переключения регулятора 11 (частотно-импульсная модуляция) изменяется среднее значение напряжения питания и тем самым регулируется ток в обмотках ШД.

Задача формирования тока в обмотках ШД решается также при использовании коммутатора 5, обладающего свойствами источника тока. В этом случае отпадает надобность в обратной связи по току и блоках 11 и 10.

Для улучшения качества движения ШД при низких частотах и повышения точности обработки входных импульсов управления с помощью блока 13 уменьшается единичный шаг ШД.

Улучшение динамических свойств дискретного ШД, в частности увеличение диапазона рабочих частот входного сигнала, значительно превышающих частоту приемистости двигателя, может быть достигнуто введением в схему блока 1, обеспечивающего разгон и торможение двигателя с заданным темпом, при котором еще не происходит пропуска управляющих импульсов. При использовании блока 1 область рабочих частот шагового электропривода может быть увеличена в 2...3 раза.

Возможности дискретного ЭП расширяются при использовании замкнутых схем управления на основе датчика 7 и регулятора 6. В таком дискретном приводе информация о действительном положении вала и скорости ШД поступает на вход цифрового регулятора 6, который обеспечивает заданный характер движения привода.

Перспективы дальнейшего развития ЭП с ШД связаны с использованием микропроцессорных средств управления. В этом случае функции всех показанных на рис. 6.14 блоков управления, за исключением силового коммутатора, датчиков скорости и положения, выполняет микропроцессор по соответствующей программе. Как говорят в таких случаях, аппаратная реализация схемы управления ШД заменяется более гибкой и функционально богатой – программной.

Область применения дискретного привода постоянно расширяется. Его используют кроме указанных ранее случаев в га-

зорезательных и сварочных автоматах, часах, нажимных устройствах прокатных станов, лентопротяжных и регистрирующих устройствах, в медицинской технике, в производстве элементов микроэлектроники и др.

## 6.8. ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Все более широкое применение находит так называемый вентильно-индукторный электропривод (ВИП), основными достоинствами которого являются простота, технологичность, невысокая стоимость применяемого индукторного электродвигателя, сочетающиеся с широкими регулировочными возможностями. Мощность таких ЭП составляет от единиц до нескольких сотен киловатт и более.

Структурная схема силовой части ВИП в случае питания его от трехфазной сети переменного тока представлена на рис. 6.15, а. В ее состав входят индукторный двигатель ИД, электронный коммутатор К, выпрямитель В, датчик положения ротора ДП и система управления СУ. Особенность ВИП состоит в применении индукторного двигателя с различным числом полюсов статора и зубцов на роторе (обычно в пределах 4...12). На рисунке в качестве примера показан трехфазный двигатель, имеющий шесть полюсов статора и четыре зубца на роторе.

На полюсах статора ИД расположены три обмотки А-а, В-в, С-с, подключенные к электронному коммутатору, выполняемому обычно на силовых транзисторах того или иного типа. В каче-

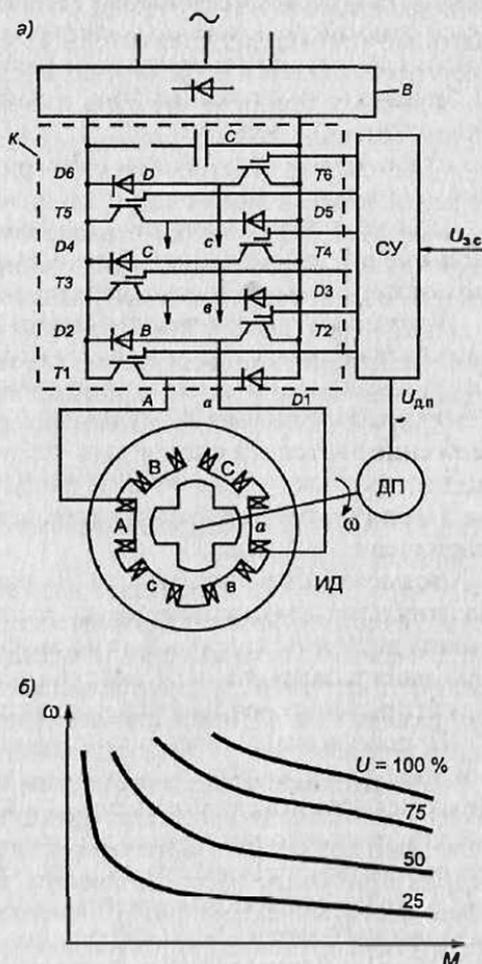


Рис. 6.15

стве управляемых ключей коммутатора используются силовые биполярные транзисторы  $T1...T6$  с изолированным затвором типа IGBT. Управление ключами осуществляет схема управления СУ, обеспечивающая подачу на них импульсов управления с необходимой последовательностью и частотой, которые определяются сигналами задания скорости  $U_{зс}$  и датчика положения  $U_{дп}$ .

Принцип действия ВИП состоит в следующем. При подаче импульсов управления на пару транзисторов (ключей) одной фазы коммутатор подключает обмотку этой фазы двигателя к выходу выпрямителя В. По обмотке начинает протекать ток, создающий в двигателе магнитное поле. Это магнитное поле вызывает появление электромагнитных сил притяжения между полюсами статора и ближайшими к ним зубцами ротора, которые и создают вращающий момент на валу двигателя. Под действием этого момента ротор перемещается в согласованное положение, в котором оси возбужденных полюсов статора и ближайших к ним зубцов ротора будут совпадать.

Так как число полюсов статора и зубцов ротора различно, то при согласованном положении ротора с работающей фазой следующая фаза оказывается в рассогласованном положении и подготовленной к очередному подключению к источнику питания. Требуемая последовательность подключения фаз двигателя к источнику питания, при которой на его валу обеспечивается постоянное направление вращающего момента, осуществляется с помощью находящегося на валу датчика положения.

Скорость вращения ротора определяется формулой

$$\omega = 2\pi f_{\kappa} / (mn), \quad (6.7)$$

где  $f_{\kappa}$  – частота коммутации обмоток;  $m$  – число фаз двигателя;  $n$  – число зубцов ротора.

Формула (6.7) показывает возможность выполнения ВИП с различными скоростями. При высокой частоте коммутации обмоток ИД имеют большие скорости вращения, а большое число полюсов статора и зубцов ротора определяет их низкие скорости. При низких скоростях ИД из кинематической схемы ВИП можно исключить редукторы.

Механические характеристики в разомкнутой структуре ВИП при различных напряжениях питания  $U$  показаны на рис. 6.15, б. При помощи различных обратных связей могут быть сформированы характеристики, обеспечивающие регулирование координат ЭП с требуемым качеством. В ВИП за счет выбора моментов включения и отключения обмоток двигателя может быть реализован и тормозной режим работы. На рис. 6.15, а диоды  $D1...D6$  служат для обеспечения возможности циркуляции электромагнитной мощности в

ЭП при отключении силовых транзисторов, а конденсатор С играет роль фильтра на выходе выпрямителя.

В современных схемах ВИП широко используются микропроцессорные средства управления, позволяющие в ряде случаев отказаться от применения датчика положения, а необходимую для работы информацию о положении ротора получать косвенным путем. Это позволяет упростить кинематическую схему ВИП и сделать его более простым и надежным.

### Контрольные вопросы

1. Какие достоинства присущи СД?
2. Что такое угловая характеристика СД?
3. В чем состоят особенности пуска СД?
4. Как включается обмотка возбуждения СД при пуске?
5. Как ограничиваются токи при пуске СД?
6. Что такое U-образные характеристики СД?
7. Как с помощью СД можно компенсировать реактивную мощность в питающей сети?
8. Каким образом происходит регулирование тока возбуждения СД?
9. В чем особенности переходных процессов в ЭП с СД?
10. Что такое вентильный двигатель?
11. Какие коммутаторы используются в ВД?
12. Поясните принцип действия шагового двигателя.
13. Какова схема управления ШД?
14. Назовите виды ШД и их особенности.
15. Назовите особенности вентильного ЭП с индукторным двигателем.

## Глава 7. ВЗАИМОСВЯЗАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Для приведения в движение исполнительных органов ряда рабочих машин используются не один, а два или более электродвигателей, что позволяет получить некоторые специфические механические характеристики ЭП, снизить суммарный момент инерции системы по сравнению с однодвигательными приводами ЭП, создавать мощные ЭП на базе серийных двигателей относительно небольшой мощности, повысить надежность работы привода за счет резервирования, а в ряде случаев – упростить механическую часть его и рабочих машин.

Два или несколько электрически или механически связанных между собой двигателя, при работе которых поддерживается заданное соотношение их скоростей, нагрузок или положение их подвижных частей, называются взаимосвязанным ЭП.

Если два или несколько двигателей работают на общий вал (механически связаны между собой), то такой взаимосвязанный ЭП называется многодвигательным. Взаимосвязанный ЭП, обеспечивающий совместную работу двух или нескольких двигателей, валы которых не имеют непосредственной механической связи, а их взаимодействие обеспечивается электрической схемой, называется электрическим валом.

В качестве примеров можно назвать взаимосвязанные ЭП поворотных платформ мощных экскаваторов и крупных порталных кранов, шлюзовых затворов и аэродинамической трубы.

### 7.1. ЭЛЕКТРОПРИВОД С МЕХАНИЧЕСКИМ СОЕДИНЕНИЕМ ВАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ

При механическом соединении валов двигателей скорость их одинакова, а момент ЭП представляет собой алгебраическую сумму моментов отдельных двигателей. Запишем суммарный момент двух двигателей, имеющих прямолинейные характеристики:

$$M = M_1 + M_2 = M_{к1}(\omega_{01} - \omega)/\omega_{01} + M_{к2}(\omega_{02} - \omega)/\omega_{02}; \quad (7.1)$$

или

$$M = |\beta_1|(\omega_{01} - \omega) + |\beta_2|(\omega_{02} - \omega), \quad (7.2)$$

где  $M_{к1}$ ,  $M_{к2}$ ,  $\omega_{01}$ ,  $\omega_{02}$ ,  $|\beta_1|$ ,  $|\beta_2|$  — соответственно моменты короткого замыкания, скорости холостого хода и модули жесткости механических характеристик каждого двигателя;  $\omega$  — текущая скорость.

Из (7.2) находим уравнение механической характеристики двухдвигательного ЭП

$$\omega = (\omega_{01} |\beta_1| + \omega_{02} |\beta_2|) / (|\beta_1| + |\beta_2|) - M / (|\beta_1| + |\beta_2|). \quad (7.3)$$

Если двигатели имеют абсолютно одинаковые характеристики, т. е.  $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$  и  $|\beta_1| = |\beta_2| = |\beta|/2$ , то

$$\omega = \omega_0 - M / |\beta|. \quad (7.4)$$

Как следует из (7.4), механическая характеристика ЭП в этом случае имеет в два раза большую жесткость, а скорость его идеального холостого хода соответствует скорости холостого хода каждого двигателя. Нагрузка электродвигателей с идентичными характеристиками распределяется между ними равномерно.

В большинстве случаев механические характеристики двигателей не являются идентичными и они могут иметь различные скорости

идеального холостого хода или жесткости. При совместной работе таких двигателей распределение нагрузки между ними происходит неравномерно.

При одинаковых скоростях идеального холостого хода, но различных жесткостях характеристик момент нагрузки  $M_c = M_1 + M_2$  в соответствии с (7.2) распределяется между двигателями следующим образом:

$$M_1 = |\beta_1| (\omega_0 - \omega + M_c / |\beta|); \quad (7.5)$$

$$M_2 = |\beta_2| (\omega_0 - \omega + M_c / |\beta|),$$

где  $|\beta| = |\beta_1| + |\beta_2|$ .

Из (7.5) следует, что двигатель, имеющий более жесткую характеристику, нагружается в большей степени и, наоборот, двигатель с мягкой характеристикой оказывается менее загруженным.

При различных скоростях холостого хода и одинаковых жесткостях характеристик распределение нагрузки между двигателями происходит в соответствии со следующими соотношениями:

$$M_1 = |\beta_1| (\omega_{01} - \omega + M_c / |\beta|); \quad (7.6)$$

$$M_2 = |\beta_2| (\omega_{02} - \omega + M_c / |\beta|).$$

Как видно из (7.6), двигатели с большей скоростью холостого хода нагружаются в большей степени.

Для одинаковой загрузки совместно работающих двигателей необходимо обеспечивать идентичность их механических характеристик. Так, при различных скоростях идеального холостого хода двигателей постоянного тока независимого возбуждения следует ввести дополнительный резистор в цепь возбуждения двигателя с меньшей скоростью. Для получения одинаковых жесткостей характеристик дополнительные резисторы вводятся в цепи якоря или ротора двигателя, имеющего более жесткую характеристику.

Отметим, что полученные выше соотношения и выводы справедливы для асинхронных двигателей, если рабочие участки их механических характеристик считать линейными.

Многодвигательный ЭП нашел достаточно широкое применение в подъемно-транспортных машинах и механизмах, так как часто бывает необходимо осуществлять их перевод на пониженную скорость перед остановкой.

В схеме ЭП с использованием двух асинхронных двигателей, приведенной на рис. 7.1, а, для понижения скорости двигатель 1 оста-

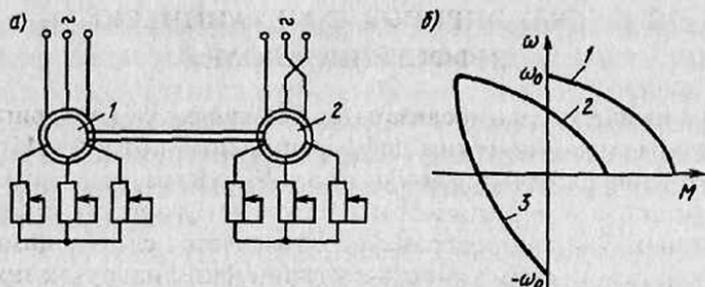


Рис. 7.1

ется работать в двигательном режиме, а двигатель 2 переводится изменением чередования фаз в режим торможения противовключением. На рис. 7.1, б приведены соответственно механические характеристики 1 и 3 этих двигателей и результирующая характеристика 2 ЭП, полученная суммированием моментов двигателей при одной и той же скорости. Участок характеристики 2 ЭП, расположенный в первом квадранте, соответствует пониженной скорости движения исполнительного органа. Отметим, что с энергетической точки зрения продолжительная работа на пониженной скорости такого ЭП является нецелесообразной, так как сопровождается большими потерями энергии в двигателе 2 (см. рис. 7.1, а).

Низкая скорость двухдвигательного ЭП (рис. 7.2, а) обеспечивается при работе АД 1 в режиме двигателя, а АД 2 – в режиме динамического торможения. Механическая характеристика ЭП 2 (см. рис. 7.2, б), получаемая в результате сложения механических характеристик соответственно 1 и 3 двигателей, имеет участок большой жесткости в области низких скоростей.

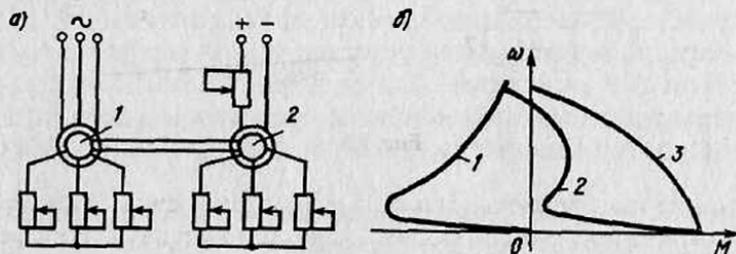


Рис. 7.2

Аналогичная характеристика ЭП может быть получена, если АД находится на одном валу с вспомогательной машиной постоянного тока, также работающей в режиме динамического торможения.

## 7.2. ЭЛЕКТРОПРИВОД С МЕХАНИЧЕСКИМ ДИФФЕРЕНЦИАЛОМ

Одним из видов взаимосвязанных ЭП являются двухдвигательные приводы с механическим дифференциалом, которые [11] находят применение в металлургическом производстве, крановых механизмах, установках бурения нефтяных скважин, горных и строительных машинах. Их распространение объясняется следующими ценными свойствами: возможностью ограничения нагрузок привода при стопорении движения исполнительного органа рабочей машины; возможностью получения большого диапазона регулирования скорости привода при относительно небольшом диапазоне регулирования скорости одного из двигателей; наличием автоматического распределения нагрузки между двигателями, а следовательно, отсутствием перегрузки одного двигателя при выходе другого из строя, малым падением скорости при приложении нагрузки.

В распространенной схеме ЭП с механическим дифференциалом (рис. 7.3, а) двигатели 1 и 6 приводят во вращение со скоростями  $\omega_1$  и  $\omega_2$  шестерни 2 и 5, по которым обкатываются шестерни 4, называемые сателлитами. Вращение сателлитов 4 приводит к вращению жестко связанной с ними выходной шестерни 3, от которой движение через дополнительную шестерню 8 передается исполнительному органу 7 рабочей машины.

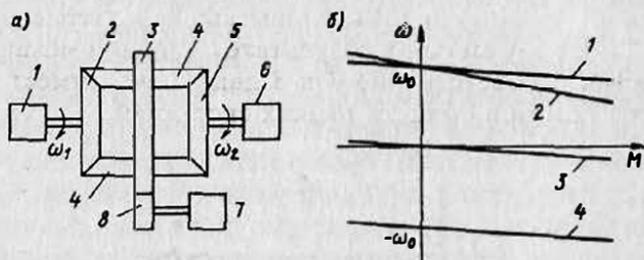


Рис. 7.3

Движение исполнительного органа в общем случае может осуществляться либо от одного двигателя, либо от двух. При работе одного из двигателей при неподвижном (заторможенном) другом приведенная схема будет соответствовать схеме обычного однодвигательного ЭП, в котором скорость выходной шестерни 3 будет определяться скоростью работающего (вращающегося) двигателя.

В случае работы двух двигателей (основной режим) выходная скорость ЭП определяется значениями и направлением скоростей  $\omega_1$  и  $\omega_2$ .

При одинаковых диаметрах шестерен 2, 5 и 4 скорость вращения сателлитов 4 относительно вертикальной оси определяется выражением

$$\omega_{\text{ср}} = (\omega_1 - \omega_2)/2, \quad (7.7)$$

а угловая скорость шестерни 3 при этом

$$\omega_3 = (\omega_1 - \omega_2)/2. \quad (7.8)$$

Если пренебречь потерями момента на преодоление сил трения в дифференциале, то момент на шестерне 3 определится суммой моментов двигателей 1 и 6, равных по значению в установившемся режиме:

$$M_3 = M_1 + M_6 = 2M. \quad (7.9)$$

Жесткость механической характеристики ЭП с дифференциалом определяется следующим выражением:

$$\beta = 4\beta_1\beta_6/(\beta_1 + \beta_6), \quad (7.10)$$

где  $\beta_1, \beta_6$  – жесткости характеристик двигателей 1 и 6.

Для примера на рис. 7.3, б показаны характеристики ЭП 1 и 3 при прямолинейных характеристиках двигателей.

В случае идентичности механических характеристик 2 обоих двигателей и одинаковом направлении их вращения характеристика ЭП 1 имеет вдвое более высокую жесткость по сравнению с характеристиками двигателей, что следует также из формулы (7.10). При вращении одного из двигателей в противоположном направлении (характеристика 4) ЭП будет иметь характеристику 3, являющуюся характеристикой динамического торможения. Используя другие искусственные характеристики двигателей, можно формировать различные искусственные характеристики ЭП с дифференциалом.

### 7.3. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВАЛОМ

В ряде случаев при необходимости использования взаимосвязанного ЭП непосредственное механическое соединение отдельных двигателей оказывается затруднительным, так как это потребует увеличения длины и диаметра соединительных валов, числа опорных подшипников и др. Иногда механическое соединение валов двигателей вообще оказывается невозможным из-за их значительного удаления друг от друга.

В этих случаях вместо громоздкой механической передачи используется так называемая система электрического вала, в которой согласованное движение двигателей обеспечивается соответствующей электрической схемой их соединения. Помимо упрощения кинематической схемы рабочей машины применение электрического вала позволяет облегчить автоматизацию технологических процессов, повысить точность работы, устранить возможное явление механического резонанса.

Электрический вал находит применение для привода разводных мостов, затворов шлюзовых камер, мощных мостовых кранов, транспортеров и др.

Современные системы электрического вала делятся на две основные группы: с вспомогательными уравнительными машинами и с основными рабочими машинами. Вспомогательные синхронные или асинхронные машины служат для выравнивания нагрузки на валах основных двигателей. В другой группе уравнительные машины отсутствуют и их функции выполняют основные машины.

Схема электрического вала с синхронными уравнительными машинами приведена на рис. 7.4, а. На валах 1 и 6 главных асинхронных двигателей 2 и 5 установлены идентичные уравнительные синхронные машины 3 и 4, статорные обмотки которых включены таким образом, чтобы наводимые в них ЭДС  $\dot{E}_1^{(1)}$  и  $\dot{E}_1^{(2)}$  были направлены навстречу друг другу. К валам 1 и 6 двигателей приложена соответственно механическая нагрузка  $M_{с1}$  и  $M_{с2}$ .

При одинаковых скоростях и нагрузках первой (2 и 3) и второй (4 и 5) пар двигателей векторы ЭДС синхронных машин 3 и 4 будут равны по значению и направлены навстречу друг другу (см. рис. 7.4, б). При этом ток в цепи статоров этих машин равен нулю и машины не развивают никаких моментов.

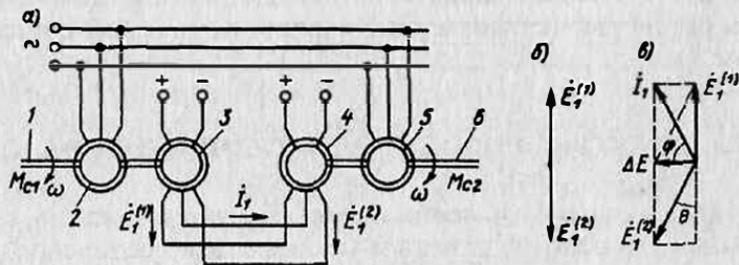


Рис. 7.4

Если в процессе работы нагрузка на одном из валов, например на втором, возрастет, то вектор ЭДС машины 4  $\dot{E}_1^{(1)}$  повернется в

сторону отставания на некоторый угол  $\theta$  (см. рис. 7.4, в). В результате этого в цепи статорных обмоток начнет действовать разностная ЭДС  $\Delta E$ , под действием которой по обмоткам статоров машин 3 и 4 потечет ток  $I_1$  (его часто называют уравнительным), и они начнут развивать момент.

Так как проекция вектора тока  $I_1$  на вектор ЭДС  $\dot{E}_1^{(1)}$  положительна, а на вектор  $\dot{E}_1^{(2)}$  отрицательна, то машина 3 начнет работать генератором, создавая на валу 1 тормозной момент, а машина 4 – двигателем. В соответствии с этим суммарный движущий момент на валу б возрастет и его скорость увеличится, а на валу 1 движущий момент уменьшится и его скорость снизится, т.е. валы 1 и б вновь начнут вращаться с одинаковой скоростью (синхронно).

Синхронизирующий момент машин определяется в соответствии с формулой (6.1) следующим выражением:

$$M_{\text{син}} = \pm E_1^{(1)} E_1^{(2)} \sin \theta / (2\omega_0 x_1), \quad (7.11)$$

где  $\theta$  – угол сдвига фаз между ЭДС  $E_1^{(1)}$  и  $E_1^{(2)}$ ;  $x_1$  – синхронное индуктивное сопротивление машины.

Рассмотренная система электрического вала имеет существенный недостаток – отсутствие синхронизирующего момента при нулевой скорости машин, так как их ЭДС в этом случае равны нулю. По этой причине чаще в качестве уравнительных машин используются асинхронные машины.

Схема электрического вала с асинхронными уравнительными машинами приведена на рис. 7.5, а. Эта схема по принципу своего действия во многом схожа со схемой, приведенной на рис. 7.4, а.

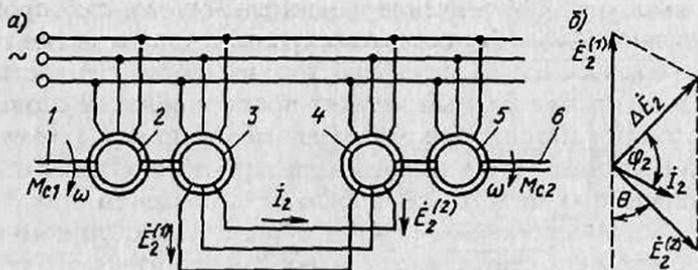


Рис. 7.5

Уравнительные машины 3 и 4 с контактными кольцами, находящиеся на валах 1 и б основных двигателей 2 и 5, представляют со-

бой идентичные АД с одинаковыми напряжением, числом фаз и полюсов, статорные обмотки которых подключены к общей трехфазной сети переменного тока, а роторные соединены между собой таким образом, чтобы наводимые в них ЭДС были направлены навстречу друг другу.

Работа электрического вала происходит следующим образом. Если нагрузка валов обеих машин одинакова, то они вращаются синхронно (и синфазно) с одинаковой скоростью. Вследствие встречного направления ЭДС вспомогательных машин  $\dot{E}_2^{(1)}$  и  $\dot{E}_2^{(2)}$ , равных по значению, ток  $I_2$  в цепи их роторов будет отсутствовать, и машины 3 и 4 моменты развить не будут.

Предположим теперь, что по каким-то причинам увеличился момент нагрузки на валу 6. Вследствие этого ротор АД 4 начнет отставать от ротора АД 3 и вектор ЭДС этой машины  $\dot{E}_2^{(2)}$  повернется в пространстве на угол  $\theta$  относительно своего прежнего положения (см. рис. 7.5, б). В результате в роторной цепи машин 3 и 4 появится разностная ЭДС  $\Delta \dot{E}_2$ , под действием которой по роторам начнет протекать уравнивающий ток  $I_2$ . Так как проекция вектора этого тока на вектор ЭДС  $\Delta \dot{E}_2$  будет положительной, то машина 4 начнет развивать дополнительный движущий момент на валу 6, за счет чего его скорость будет выравниваться со скоростью вала 1.

Уравнивающее действие машин 3 и 4 определяется уравнивающим (синхронизирующим) моментом

$$M_{ур} = M_{н.с} s \sin \theta / s_k, \quad (7.12)$$

где  $M_{н.с} = 2M_k (s/s_k + s_k/s)$  – момент вспомогательных асинхронных машин 3 и 4 в нормальной (основной) схеме включения.

Уравнивающее действие вспомогательных машин тем больше, чем больше угол  $\theta$ . Увеличение уравнивающего момента происходит до значений  $\theta = \pi/2$ , после чего уравнивающий момент начнет уменьшаться и система электрического вала может выпасть из синхронизма. Уравнивающий момент пропорционален скольжению, при котором работают вспомогательные машины. Поэтому при создании системы электрического вала стремятся обеспечить работу этих машин при возможно большем их скольжении. Для этого выбирают вспомогательные машины с более высокими номинальными скоростями по сравнению с основными двигателями или используют вращение вспомогательных машин против магнитного поля со скольжениями больше единицы.

В первом случае обеспечивается скольжение вспомогательных машин не более единицы. Например, если основные двигатели электрического вала имеют номинальную скорость в два раза меньшую,

чем вспомогательные машины, то работа последних будет происходить при скольжениях  $s \geq 0,5$ .

Обеспечение вращения вспомогательных машин против поля реализуется на практике чаще, так как это не связано с использованием разнотипных машин и дает больший уравнительный эффект. Вместе с тем следует отметить, что в этом случае в цепях роторов вспомогательных машин повышаются потери мощности из-за увеличенной частоты тока ротора.

**Схема электрического вала без вспомогательных машин** приведена на рис. 7.6. Система электрического вала может быть выполнена также только из основных двигателей, которые в этом случае выполняют функции как рабочих, так и уравнительных машин. Для этого статорные обмотки двигателей 1 и 2 подключаются параллельно к питающей сети, а роторные соединяются встречно. Параллельно обмоткам ротора во все три фазы включаются регулируемые резисторы 3 с сопротивлением  $R_{2д}$ . При  $R_{2д} = 0$  электрический вал работает как обычные, независимо работающие друг от друга асинхронные двигатели с короткозамкнутыми роторами.

При  $R_{2д} \neq 0$  и вращении АД с одинаковой скоростью угол сдвига между векторами ЭДС машин  $\theta = 0$  и они развивают одинаковые моменты, работая на реостатных характеристиках.

При увеличении нагрузки одного из двигателей угол  $\theta$  становится не равным нулю, поэтому появляются уравнительные ток и момент. Уравнительный момент будет разгружать машину с большей нагрузкой и догружать менее нагруженную, при этом скорости двигателей выравниваются, а положение их роторов будет характеризоваться некоторым углом рассогласования  $\theta \neq 0$ . Максимально допустимый угол рассогласования для рассматриваемой схемы, как и для системы с уравнительными машинами, составляет  $\pi/2$ .

Основным достоинством электрического вала с основными рабочими машинами является отсутствие вспомогательных машин.

Однако для увеличения уравнительного момента путем повышения скольжения в роторную цепь двигателей необходимо включать дополнительные сопротивления, что приводит к дополнительным потерям мощности в ней. Обычно электрический вал с основными рабочими машинами применяется лишь при небольшой разнице моментов нагрузки, приложенных к обоим валам.

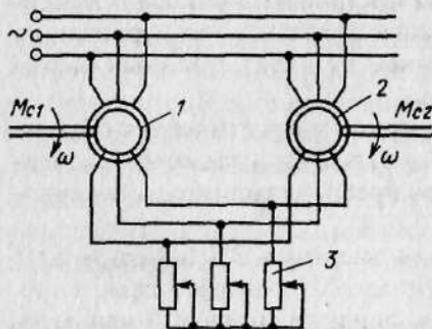


Рис. 7.6

## Контрольные вопросы

1. Что называется взаимосвязанным ЭП?
2. Какой взаимосвязанный ЭП называется многодвигательным и какой — электрическим валом?
3. Каковы отличительные свойства ЭП с механическим дифференциалом?
4. За счет чего происходит выравнивание скоростей основных двигателей в схеме электрического вала с уравнительными машинами?
5. Поясните принцип действия электрического вала без уравнительных машин.

## Глава 8. ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Главное назначение ЭП заключается в обеспечении движения исполнительных органов рабочих машин и механизмов и управлении этим движением. Однако необходимо учитывать, каковы при этом потребление и потери электроэнергии, как ЭП влияет на сеть и другие электроприемники. Оценка этих свойств ЭП осуществляется с помощью так называемых энергетических показателей, к числу которых относятся коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, потери мощности и энергии, а иногда и потребляемые из сети полезные мощность и энергия.

Энергетические показатели широко используются как при создании новых, так и при оценке работы уже действующих ЭП. Очевидно, что предпочтительный ЭП, обеспечивая заданный технологический процесс рабочей машины или механизма, должен иметь более высокие по сравнению с другими энергетические показатели. Если эти показатели уже работающих ЭП оказываются существенно хуже номинальных, правомочна постановка вопроса о модернизации этих ЭП. Причем капитальные затраты на модернизацию должны сопоставляться с сокращением эксплуатационных расходов за счет повышения КПД и  $\cos \varphi$ .

Подчеркнем, что обеспечение высоких энергетических показателей ЭП весьма актуально в настоящее время, когда экономия энергетических и материальных ресурсов превратилась в задачу первоочередной важности.

В общем случае потери мощности и энергии в ЭП складываются из потерь в электродвигателе, механической передаче, силовом преобразователе и системе управления, однако основными являются потери в электродвигателе, которым далее и уделяется основное внимание.

## 8.1. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Потери мощности  $\Delta P$  в электродвигателе удобно представить суммой двух составляющих потерь – постоянных  $K$  и переменных  $V$ , т.е.

$$\Delta P = K + V. \quad (8.1)$$

Под постоянными подразумеваются потери мощности, не зависящие от нагрузки двигателя. К ним относятся потери в стали магнитопровода, механические потери от трения в подшипниках и вентиляционные потери. В СД и двигателе постоянного тока с независимым возбуждением к постоянным потерям обычно относят и потери в обмотках возбуждения.

Строго говоря, постоянные потери в действительности не являются неизменными, а зависят от скорости двигателя, амплитуды и частоты питающего его напряжения и ряда других факторов. Однако, поскольку эти потери изменяются незначительно, они обычно принимаются неизменными и равными номинальным.

Под переменными подразумеваются потери, выделяемые в обмотках двигателей при протекании по ним токов, определяемых механической нагрузкой ЭП. Переменные потери мощности в двигателе могут быть в общем случае определены через электрические или механические переменные и параметры.

В двигателях постоянного тока переменные потери мощности

$$V = I^2 R, \quad (8.2)$$

где  $I$ ,  $R$  – соответственно ток и сопротивление цепи якоря двигателя.

В трехфазных асинхронных двигателях

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2', \quad (8.3)$$

где  $V_1$ ,  $V_2$  – потери мощности соответственно в цепях обмоток статора и ротора. При использовании П-образной схемы замещения (см. рис. 5.2), когда по резистору  $R_1$  протекает ток  $I_2'$ , потери в статоре

$$V_1 = 3I_1^2 R_1 = I_2'^2 R_1 R_2' / R_2' = V_2 R_1 / R_2', \quad (8.4)$$

а полные переменные потери

$$V = 3I_2'^2 (R_1 + R_2') = V_2 (1 + R_1 / R_2'). \quad (8.5)$$

В синхронных двигателях

$$V = 3I_1^2 R_1 \quad (8.6)$$

Потери мощности при работе двигателя в номинальном режиме определяются по его паспортным данным с помощью номинального КПД и номинальной мощности двигателя:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) / \eta_{\text{ном}} \quad (8.7)$$

Постоянные потери мощности

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}} \quad (8.8)$$

Потери энергии в двигателе. За время работы  $t_p$  двигателя с постоянной нагрузкой полные потери энергии, обусловленные  $K$  и  $V$ ,

$$\Delta A = \Delta P t_p \quad (8.9)$$

При работе двигателя с циклически изменяющейся нагрузкой полные потери энергии за весь цикл

$$\Delta A = \int_0^{t_u} \Delta P(t) dt = \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i \quad (8.10)$$

где  $\Delta P_i$ ,  $t_i$  – потери мощности и время работы на  $i$ -м участке цикла;  $m$  – число отдельных участков цикла,  $\sum_{i=1}^m t_i = t_u$  – время цикла.

Приведенные выше формулы позволяют выполнить расчет потерь мощности и энергии по токам и сопротивлениям цепей двигателей. Эти же потери могут быть рассчитаны и по механическим переменным и параметрам двигателей.

Переменные потери мощности, выделяющиеся в якоре двигателя постоянного тока и роторе асинхронного двигателя, могут быть также определены с помощью выражения (4.11) через механические переменные и параметры

$$V = V_2 = M\omega_0 s = M\omega_0 s, \quad (8.11)$$

где  $\delta = s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$  – относительная скорость ДПТ или скольжение АД.

Переменные потери в статоре АД в соответствии с (8.4)

$$V_1 = V_2 R_1 / R_2' = M\omega_0 s R_1 / R_2' \quad (8.12)$$

Полные переменные потери в АД:

$$V = V_1 + V_2 = M\omega_0 s (1 + R_1 / R_2') \quad (8.13)$$

Формула (8.13) позволяет рассчитывать потери мощности в АД по известным моменту, скорости идеального холостого хода (скорости вращения магнитного поля), скольжению и отношению сопротивлений  $R_1$  и  $R_2'$ .

Полные потери энергии в двигателях и в этом случае рассчитываются по (8.9) или (8.10).

Потери мощности и энергии в преобразователе являются электрическими и определяются по формулам (8.2) и (8.9). При использовании для управления двигателями полупроводниковых преобразователей потери в них складываются из потерь в вентилях, трансформаторах, сглаживающих и уравнивающих реакторах, фильтрах и элементах устройств искусственной коммутации. Потери в полупроводниковых элементах преобразователей обычно относительно малы (несколько процентов от номинальной мощности).

При расчете потерь в трансформаторах и реакторах берется сопротивление их обмоток или эквивалентное сопротивление преобразователя, определяемое формулой (4.34).

Потери мощности в маломощной системе управления обычно не превышают нескольких десятков ватт и принимаются во внимание только при выполнении точных энергетических расчетов.

Потери мощности в механической передаче определяются главным образом трением в движущихся частях и существенно зависят от передаваемого момента.

Потери в механической передаче обычно оцениваются с помощью КПД, значение которого для разных ее видов и нагрузок приводятся в справочной литературе, например в [24].

Задача 8.1\*. АД типа 4АН160S4 имеет номинальные мощность  $P_{ном} = 18,5$  кВт; скорость  $n_{ном} = 1450$  об/мин; ток статора  $I_{1ном} = 36,5$  А; КПД  $\eta_{ном} = 88\%$ ;  $\cos \varphi_{ном} = 0,87$ ;  $M_{пуск}/M_{ном} = 1,3$ ;  $M_{max}/M_{ном} = 2,1$ ;  $J = 0,37$  кг·м<sup>2</sup>.

Рассчитать потери мощности в АД при его работе с моментом  $M_c = 0,9M_{ном}$  на естественной характеристике, если соотношение  $R_1/R_2' = 0,6$ .

Так как режим работы задан моментом нагрузки, используем формулы для расчета потерь через механические координаты и параметры. Определяем скорости АД в номинальном режиме и при холостом ходе:

$$\omega_{ном} = 2\pi n_{ном}/60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1450/30 = 152 \text{ рад/с};$$

$$\omega_0 = 2\pi f_1/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50/2 = 157 \text{ рад/с}.$$

Определяем номинальные скольжение и момент АД:

$$s_{ном} = (\omega_0 - \omega_{ном})/\omega_0 = (157 - 152)/157 = 0,033;$$

$$M_{ном} = P_{ном}/\omega_{ном} = 18500/152 = 122 \text{ Н·м}.$$

Принимая рабочий участок механической характеристики АД линейным, из (5.16) при  $M_c = 0,9 M_{ном} = 0,9 \cdot 122 = 110 \text{ Н}\cdot\text{м}$  находим

$$s_c = s_{ном} M_c / M_{ном} = 0,033 \cdot 0,9 = 0,03.$$

По формуле (8.13) определяем переменные потери мощности в заданной точке:

$$V = V_1 + V_2 = M \omega_0 s (1 + R_1 / R_2') = 110 \cdot 157 \cdot 0,03 (1 + 0,6) = 829 \text{ Вт}.$$

Находим по (8.7) полные потери АД в номинальном режиме:

$$\Delta P_{ном} = P_{ном} (1 - \eta_{ном}) / \eta_{ном} = 18500 (1 - 0,88) / 0,88 = 2523 \text{ Вт}.$$

Переменные потери в номинальном режиме также находим по (8.13):

$$V_{ном} = M_{ном} \omega_0 s_{ном} (1 + R_1 / R_2') = 122 \cdot 157 \cdot 0,033 (1 + 0,6) = 1011 \text{ Вт}.$$

Постоянные потери в АД

$$K = \Delta P_{ном} - V_{ном} = 2523 - 1011 = 1512 \text{ Вт}.$$

**Задача 8.2\*.** ДПТНВ типа 2ПН-13-2 имеет следующие номинальные данные:  $P_{ном} = 5,5 \text{ кВт}$ ;  $U_{ном} = 110 \text{ В}$ ;  $I_{ном} = 59 \text{ А}$ ;  $n_{ном} = 1500 \text{ об/мин}$ ;  $\eta_{ном} = 80\%$ ;  $R_a = 0,146 \text{ Ом}$ ;  $J = 0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Определить переменные потери энергии в ядре двигателя за цикл работы, в котором он в течение времени  $t_1 = 10 \text{ мин}$  работает с моментом нагрузки  $M_{c1} = 0,6 M_{ном}$ , в течение времени  $t_2 = 3 \text{ мин}$  работает с номинальной нагрузкой  $M_{c2} = M_{ном}$  и в течение времени  $t_3 = 15 \text{ мин}$  работает с моментом  $M_{c3} = 0,8 M_{ном}$ . Ток возбуждения двигателя в цикле не изменяется и равен номинальному.

Поскольку магнитный поток двигателя не изменяется, по известным кратностям момента с помощью формулы (4.3) можно найти токи в цепи якоря на отдельных участках цикла:

$$I_{c1} = I_{ном} M_{c1} / M_{ном} = 59 \cdot 0,6 = 35,4 \text{ А}; \quad I_{c2} = I_{ном} = 59 \text{ А}; \quad I_{c3} = 0,8 I_{ном} = 47,2 \text{ А}.$$

Потери энергии в обмотке якоря в соответствии с формулой (8.10)

$$\Delta A = \sum_{i=1}^3 V_i t_i = \sum_{i=1}^3 I_i^2 R_a t_i = 0,146 (35,4^2 \cdot 600 + 59^2 \cdot 180 + 47,2^2 \cdot 900) = 493,8 \text{ кДж}.$$

**Задача 8.3.** Для условий задачи 8.1 определить количество энергии, потребляемой из сети АД в номинальном режиме и в заданной точке за один час.

**Задача 8.4.** Для условий задачи 8.2 определить количество потребляемой из сети электроэнергии за время цикла.

## 8.2. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Возникающие при пуске, реверсе, торможении, изменении скорости и изменении нагрузки токи, как правило, превышают номинальный уровень. По этой причине выделяющиеся в двигателе и других элементах ЭП потери могут быть весьма значительными и существенно влиять на энергетические показатели его работы. Отметим также, что повышенные потери в двигателе вызывают его дополнительный нагрев, что подчеркивает важность правильной их оценки.

Особенно большое значение определение потерь электроэнергии в переходных процессах имеет для ЭП, у которых динамический режим является основным. К ним относятся, например, ЭП прокатных станов, подъемных кранов, строгальных станков, лифтов и др.

В общем случае потери энергии за время переходного процесса  $t_{н.п}$  могут быть определены с помощью следующего выражения:

$$\Delta A = \int_0^{t_{н.п}} \Delta P dt = \int_0^{t_{н.п}} K dt + \int_0^{t_{н.п}} V dt = \Delta A_K + \Delta A_V, \quad (8.14)$$

где  $\Delta A_K$  и  $\Delta A_V$  — потери энергии, обусловленные соответственно постоянными и переменными потерями мощности.

Потери энергии  $\Delta A_K$  легко можно найти в том случае, когда постоянные потери мощности  $K$  не изменяются за время переходного процесса, т.е.

$$\Delta A_K = K t_{н.п}. \quad (8.15)$$

Потери энергии  $\Delta A_V$  можно найти с помощью формул (8.2) ... (8.4), выражающих переменные потери мощности через ток и сопротивление:

$$\Delta A = \int_0^{t_{н.п}} i^2(t) R dt. \quad (8.16)$$

Использование выражения (8.16) для определения  $\Delta A_V$  во многих случаях оказывается затруднительным из-за того, что при этом необходимо знать закон изменения тока двигателя в переходном процессе  $i(t)$ , а также располагать данными об изменении сопротивления  $R$ . Так как часто зависимость  $i(t)$  не выражается аналитически, а в переходных процессах  $R$  изменяется, то точное вычисление интеграла (8.16) оказывается затруднительным.

Более удобные расчетные соотношения для определения потерь энергии в переходных процессах получаются в том случае, если пе-

ременные потери мощности выражаются через механические переменные и параметры.

**Потери энергии при работе ЭП без нагрузки ( $M_c = 0$ ).** Потери мощности в якоре ДПТ и роторе АД определяются по одной формуле (8.11) и поэтому переменные потери энергии в этих частях двигателей также определяются идентично:

$$\Delta A_{V0} = \Delta A_{20} = \int_0^{t_{п.п}} M \omega_0 s dt = \int_0^{t_{п.п}} M (\omega_0 - \omega) dt, \quad (8.17)$$

где  $s = \delta = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$  – скольжение или относительная скорость двигателей.

Исключим из (8.17) время как переменную, воспользовавшись для этого уравнением механического движения (2.16). При  $M_c = 0$  с учетом (5.4) получим

$$dt = J d\omega / M = -J \omega_0 ds / M. \quad (8.18)$$

Заменим в (8.17)  $dt$  согласно (8.18), изменив одновременно пределы интегрирования, т. е. начальному моменту времени переходного процесса  $t = 0$  будет соответствовать скольжение  $s = s_{нач}$ , а конечному времени  $t_{п.п}$  – скольжение  $s = s_{кон}$ . Тогда (8.18) будет иметь вид

$$\Delta A_{20} = \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} M \omega_0 s (-J \omega_0 ds / M) = -J \omega_0^2 \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} s ds = J \omega_0^2 (s_{нач}^2 - s_{кон}^2) / 2. \quad (8.19)$$

Полученное выражение (8.19) удобно для определения потерь энергии, так как при его использовании не требуется знать зависимость изменения координат ЭП во времени, а необходимо лишь иметь параметры  $J$ ,  $\omega_0$  и значения  $s_{нач}$  и  $s_{кон}$ .

Определим с помощью (8.19), для примера, потери энергии в якоре ДПТ и роторе АД при их пуске, реверсе и торможении вхолостую.

При пуске двигателей  $\omega_{нач} = 0$  и  $\omega_{кон} = \omega_0$ , поэтому  $s_{нач} = 1$ ,  $s_{кон} = 0$ , в соответствии с чем

$$\Delta A_{20}^п = J \omega_0^2 / 2. \quad (8.20)$$

Интересно отметить, что в соответствии с (8.20) численно потери энергии равны кинетической энергии, которая будет запасена к концу пуска в движущихся механических частях ЭП.

При динамическом торможении потери энергии, поскольку  $s_{нач} = 1$  и  $s_{кон} = 0$ , также определяются выражением (8.20), т. е.  $\Delta A_{20}^п = \Delta A_{20}^т$ . В этом режиме весь запас кинетической энергии в ЭП превращается в потери энергии, выделяемые в виде тепла.

При торможении противовключением  $s_{\text{нач}} = 2, s_{\text{кон}} = 1$ , а потери энергии

$$\Delta A_{20}^T = 3J\omega_0^2/2, \quad (8.21)$$

т.е. они равны тройному запасу кинетической энергии ЭП. Следовательно, потери энергии при торможении противовключением существенно (в 3 раза) превышают потери при динамическом торможении.

При реверсе  $s_{\text{нач}} = 2, s_{\text{кон}} = 0$  и потери энергии

$$\Delta A_{20}^P = 4J\omega_0^2/2, \quad (8.22)$$

т.е. они равны сумме потерь при торможении противовключением и пуске.

Выражение (8.19) определяет полные переменные потери энергии в ДПТ, т.е.  $\Delta A_{20} = \Delta A_{10}$ .

Для определения полных переменных потерь энергии в АД необходимо найти еще потери в цепи статора. Для этого воспользуемся выражением (8.12), из которого следует, что

$$\Delta A_{10} = \Delta A_{20} R_1 / R_2'. \quad (8.23)$$

Тогда полные потери энергии в АД

$$\Delta A_{10} = \Delta A_{10} + \Delta A_{20} = J\omega_0^2(1 + R_1/R_2')(s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2)/2. \quad (8.24)$$

Отметим, что потери энергии в роторе АД не зависят от его сопротивления, в то время как потери в статоре АД обратно пропорциональны его сопротивлению.

**Потери энергии при работе ЭП с нагрузкой ( $M_c \neq 0$ ).** Для определения потерь энергии при работе двигателей под нагрузкой справедлива также исходная формула (8.17). Из этой формулы видно, что для определения потерь энергии в якоре ДПТ и роторе АД необходимо знать, каким образом в переходных процессах изменяются скорость двигателя и момент его нагрузки, т.е. надо иметь зависимости  $\omega(t)$  и  $M(t)$ . Подставив эти зависимости в формулу (8.17), можно решить поставленную задачу.

Для оценочных расчетов энергетических показателей выполняются упрощенный расчет потерь энергии, т.е. считают, что момент двигателя в переходных процессах не изменяется и равен некоторому среднему моменту  $M_{\text{cp}}$ , при котором продолжительность переходных процессов остается примерно той же самой, что и при реальном изменении момента двигателя. Для получения расчетной формулы используется исходная формула (8.17), в которой

$$dt = -J\omega_0 ds / (M \pm M_c),$$

где знак «-» соответствует пуску, а знак «+» – торможению двигателя. Подставив  $dt$  в (8.17) и одновременно заменив пределы интегрирования и  $M$  на  $M_{cp} = \text{const}$ , получим следующее выражение:

$$\Delta A_{2н} = \Delta A_{20} M_{cp} / (M_{cp} \pm M_c), \quad (8.25)$$

где  $M_{cp}$  – средний, неизменный за время переходного процесса момент двигателя.

Выражение (8.25) определяет потери энергии под нагрузкой в переходных процессах в роторе АД и якоре ДПТ. Для определения потерь в статоре  $\Delta A_{ин}$  и полных потерь  $\Delta A_{ц}$  в АД используются формулы (8.23) и (8.24).

Отметим, что в соответствии с (8.25) потери энергии при работе двигателя под нагрузкой по сравнению с потерями при работе его холостую увеличиваются в режиме пуска и уменьшаются в режиме торможения. Последнее объясняется тем, что при торможении часть запасенной кинетической энергии расходуется на преодоление момента нагрузки, поэтому в двигателе выделяется в виде потерь уже только ее оставшаяся часть.

**Потери энергии в системе «преобразователь – двигатель».** Положительным свойством системы П–Д является возможность существенного сокращения потерь энергии в переходных процессах. Это достигается путем плавного изменения в переходных процессах с помощью управляемого выпрямителя напряжения для ДПТ и с помощью преобразователя частоты – частоты напряжения для АД, в результате чего происходит постепенное изменение и задаваемой ими скорости идеального холостого хода двигателей. При этом разность между скоростью  $\omega_0$  и скоростью якоря или ротора  $\omega$  оказывается меньшей, чем при скачкообразном изменении напряжения или частоты, что и ведет к сокращению потерь в двигателе. В пределе, когда  $M_c = 0$  и скорость  $\omega_0$  изменяется бесконечно медленно, отдаваемая источником энергия идет только на сообщение двигателю кинетической энергии, а потери ее отсутствуют.

Рассмотрим, чему будут равны потери энергии в двигателе при линейном изменении во времени скорости идеального холостого хода. Переходные процессы в этом случае (см. разд. 4.8) разбиваются на два этапа. На первом этапе в пределах отрезка времени  $0 < t < t_0$  скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  меняется по линейному закону:

$$\omega_0 = \pm \varepsilon t + \omega_{0нач}, \quad (8.26)$$

где  $\varepsilon = d\omega_0(t)/dt$ , – темп (производная) изменения скорости  $\omega_0$ , а скорость и момент двигателя изменяются в соответствии с выраже-

ниями (4.49) и (4.50). На втором этапе при  $t > t_0$   $\omega_0 = \text{const}$  и скорость и момент изменяются согласно выражениям (2.30) и (2.32).

Соответственно потери энергии во время переходного процесса можно представить в виде суммы двух составляющих для каждого из этапов.

Потери энергии в якоре ДПТ и роторе АД на первом этапе переходного процесса можно получить с помощью исходной формулы (8.17), подставив в нее зависимости  $\omega(t)$  из (4.49) и  $M(t)$  из (4.50). На втором этапе переходного процесса потери энергии определяются также с помощью (8.17), но при подстановке в нее выражений  $\omega(t)$  и  $M(t)$  соответственно из (2.30) и (2.32).

Как видно, в общем случае расчет потерь энергии в системе П-Д представляет собой непростую задачу, решение которой подробно рассмотрено в [8, 12, 14]. В частном случае, при пуске двигателя вхолостую, итоговое выражение для потерь энергии будет иметь вид

$$\Delta A_{20}^n = \Delta A_{20} \cdot 2T_m / t_{n0}, \quad (8.27)$$

где  $T_m$  – электромеханическая постоянная времени;  $t_{n0}$  – время линейного нарастания скорости  $\omega_0$  от нуля до установившейся скорости;  $\Delta A_{20}$  – потери энергии при ступенчатом изменении скорости  $\omega_0$ , определяемые по (8.19).

Как видно из (8.27), при увеличении времени  $t_{n0}$  потери энергии в двигателе уменьшаются. Снижение потерь энергии имеет место также при реверсе и торможении двигателя в случае плавного изменения скорости  $\omega_0$ .

Невелики потери энергии в переходных процессах ДПТНВ при его питании от генератора (система «генератор–двигатель»). В этом случае ЭДС генератора и скорость идеального холостого хода двигателя изменяются в переходных режимах по экспоненциальному закону, что определяется процессами в инерционной цепи возбуждения генератора. В режиме пуска вхолостую потери энергии в двигателе

$$\Delta A_{20} = \Delta A_{V0} = J\omega_0^2 / [2(m+1)], \quad (8.28)$$

где  $m = T_n / T_m$  – кратность постоянных времени;  $T_n$  – постоянная времени цепи возбуждения генератора.

Из (8.28) видно, что потери энергии в двигателе в этом случае уменьшаются в  $(m+1)$  раз по сравнению с соответствующими потерями в нем при скачкообразном изменении напряжения на якоре. Другими словами, чем инерционнее цепь возбуждения генератора и чем медленнее изменяется напряжение на якоре ДПТ, тем меньше будут в нем потери энергии в переходных процессах.

**Способы снижения потерь электроэнергии в переходных процессах.** Уменьшение потерь электроэнергии в переходных процессах имеет важное значение, поскольку позволяет улучшить энергетические показатели работы ЭП.

Анализ полученных формул, в частности (8.19), определяет два основных способа снижения потерь электроэнергии в переходных процессах: уменьшение момента инерции ЭП  $J$  и регулирование в переходных процессах скорости идеального холостого хода двигателей  $\omega_0$ .

Уменьшение момента инерции ЭП возможно за счет снижения момента инерции применяемых электродвигателей, т.е. за счет использования малоинерционных двигателей, имеющих пониженный момент инерции якоря (двигатели с повышенным отношением длины якоря к его диаметру, с полым или дисковым якорем); рационального конструирования механической передачи (выбора оптимального передаточного числа редуктора, рациональных размеров и форм элементов механической передачи); замены одного двигателя двумя, имеющими его половинную номинальную мощность. Расчеты показывают, что суммарный момент инерции двух двигателей половинной мощности оказывается меньше момента инерции одного двигателя полной мощности. Например, два двигателя типа 4АН200 мощностью по 45 кВт имеют суммарный момент инерции  $2 \cdot 1,38 = 2,76 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Двигатель 4АН250 мощностью 90 кВт, рассчитанный на ту же скорость, имеет момент инерции  $3,53 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , т.е. почти на 30% больше.

Регулирование скорости идеального холостого хода двигателей постоянного тока обеспечивается изменением напряжения на якоре в системе «управляемый выпрямитель – двигатель», а АД – изменением частоты питающего напряжения в системе «преобразователь частоты – АД» или числа пар полюсов в многоскоростном АД. Остановимся на снижении потерь в ЭП с многоскоростным АД.

В качестве примера рассчитаем потери электроэнергии в роторе двухскоростного АД при разбеге его до высокой скорости (характеристика 1) и торможении с высокой скорости при отсутствии нагрузки с помощью механических характеристик, приведенных на рис. 8.1.

Пуск АД возможен двумя способами: включением обмотки статора сразу на число пар полюсов  $p_1$  (пря-

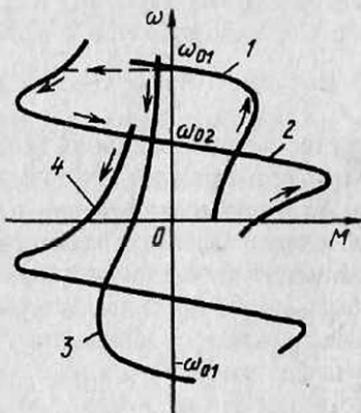


Рис. 8.1

мой пуск, характеристика 1) или включением обмотки статора сначала на число пар полюсов  $p_2 = 2p_1$  (характеристика 2), а затем переключением обмотки статора на число пар полюсов  $p_1$  (ступенчатый пуск).

Потери энергии в роторе АД при прямом пуске по характеристике 1 в соответствии с (8.19) и учетом того, что  $s_{\text{нач}} = 1$ , а  $s_{\text{кон}} = 0$  будут иметь вид  $\Delta A_{2п} = J\omega_{01}^2/2$ .

Потери энергии при ступенчатом пуске при разбеге АД по характеристике 2 (первая ступень пуска) с учетом того, что  $s_{\text{нач}} = 1$ ,  $s_{\text{кон}} = 0$  и  $\omega_{02} = \omega_{01}/2$ , будут иметь вид

$$\Delta A_{2c1} = J\omega_{02}^2/2 = J\omega_{01}^2/8,$$

а при разбеге АД по характеристике 1 (вторая ступень пуска) с учетом того, что  $s_{\text{нач}} = 0,5$ ,  $s_{\text{кон}} = 0$ ,

$$\Delta A_{2c2} = J\omega_{01}^2/8.$$

Суммарные потери при ступенчатом пуске

$$\Delta A_{2c} = \Delta A_{2c1} + \Delta A_{2c2} = J\omega_{01}^2/4.$$

Сопоставление показывает, что при ступенчатом пуске произошло снижение потерь электроэнергии в два раза по сравнению с прямым пуском. Таким образом, за счет изменения в переходном процессе скорости холостого хода происходит снижение потерь энергии в роторе, которое определяет снижение потерь в статоре и полных потерь в АД.

В общем случае, если скорость идеального холостого хода в переходном процессе имеет  $n$  ступеней регулирования, потери энергии в роторе уменьшатся в  $n$  раз:

$$\Delta A_2 = J\omega_{0n}^2/(2n),$$

где  $\omega_{0n}$  – максимальная скорость идеального холостого хода двигателя, соответствующая последней ступени.

Сокращаются потери в многоскоростном АД и при ступенчатом торможении с высокой скорости. При торможении противовключением в одну ступень двигатель с характеристики 1 переходит на работу по характеристике 3, соответствующей тому же числу пар полюсов двигателя  $p_1$ , но при измененном порядке чередования фаз напряжения на статоре. Потери энергии в роторе за время торможения до нулевой скорости

$$\Delta A_2 = 3J\omega_{01}^2/2.$$

При ступенчатом торможении путем изменения числа пар полюсов с  $p_1$  на  $p_2 = 2p_1$ , АД сначала переходит на работу по характеристике 2, при которой он тормозится до скорости  $\omega_{02}$  с отдачей энергии в сеть. Потери энергии на этом этапе (при  $s_{нач} = -1$ ,  $s_{кон} = 0$ )

$$\Delta A_{2c1} = J\omega_{02}^2/2 = J\omega_{01}^2/8.$$

На следующем этапе путем изменения чередования фаз при том же числе пар полюсов осуществляется торможение противовключением (характеристика 4), потери при котором (при  $s_{нач} = 2$ ,  $s_{кон} = 1$ )

$$\Delta A_{2c2} = 3J\omega_{02}^2/2 = 3J\omega_{01}^2/8.$$

Суммарные потери при ступенчатом торможении

$$\Delta A_{2c} = \Delta A_{2c1} + \Delta A_{2c2} = J\omega_{01}^2/2,$$

т.е. в три раза меньше, чем при прямом торможении. Пропорционально этому снизятся потери в статоре и суммарные потери в АД.

**Задача 8.5\***. Определить переменные потери энергии в АД типа 4АН160S4 при пуске вхолостую и при номинальном моменте нагрузки (см. данные задачи 8.1).

При пуске вхолостую  $s_{нач} = 1$ ,  $s_{кон} = 0$ . По формуле (8.24) определим переменные потери в двигателе:

$$\Delta A_{v0} = J\omega_0^2(1 + R_1/R_2')(s_{нач}^2 - s_{кон}^2)/2 = 0,37 \cdot 157^2(1 + 0,6)(1^2 - 0^2)/2 = 7296 \text{ Дж.}$$

Для расчета потерь энергии при пуске под нагрузкой воспользуемся приближенной формулой (8.25). Средний момент двигателя при пуске примем равным половине суммы пускового и максимального (критического) моментов:

$$M_{cp} = (M_{пуск} + M_{макс})/2 = (1,3M_{ном} + 2,1M_{ном})/2 = 1,22(1,3 + 2,1)/2 = 207 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Потери при пуске с номинальной нагрузкой  $M_c = M_{ном}$

$$\Delta A_{vном} = \Delta A_{v0} M_{cp} / (M_{cp} - M_c) = 7296 \cdot 207 / (207 - 122) = 17685 \text{ Дж.}$$

**Задача 8.6\***. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением типа 2ПН-132 (см. данные задачи 8.2) сопоставить потери энергии в якоре при его пуске вхолостую от сети и от управляемого преобразователя со временем нарастания его входного напряжения  $t_{\omega} = 1$  с. Суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции составляет  $0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Предварительно определим номинальную скорость:

$$\omega_{ном} = \pi n_{ном} / 30 = 3,14 \cdot 1500 / 30 = 157 \text{ рад / с.}$$

Найдем произведение  $k\Phi_{ном}$ , используя формулу электромеханической характеристики (4.4) для точки номинального режима,

$$k\Phi_{\text{ном}} = (U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{ном}}) / \omega_{\text{ном}} = (110 - 59 \cdot 0,146) / 157 = 0,65 \text{ В} \cdot \text{с}$$

и скорость холостого хода

$$\omega_0 = U_{\text{ном}} / k\Phi_{\text{ном}} = 110 / 0,65 = 169 \text{ рад / с.}$$

По формуле (8.19) определим потери энергии в якоре при пуске двигателя вхолостую от сети (ступенчатая подача напряжения):

$$\Delta A_{V0} = J\omega_0^2 (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) / 2 = 0,1 \cdot 169^2 (1^2 - 0^2) / 2 = 1428 \text{ Дж.}$$

Определим номинальный момент двигателя и электромеханическую постоянную времени ЭП:

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 5500 / 157 = 53 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$T_{\text{м}} = J\omega_0 / M_{\text{к.з}} = J(\omega_0 - \omega_{\text{ном}}) / M_{\text{ном}} = 0,1(169 - 157) / 35 = 0,03 \text{ с.}$$

По формуле (8.31) вычислим потери энергии в якоре при линейном нарастании напряжения в течение одной секунды:

$$\Delta A_{V0}'' = \Delta A_{V0} \cdot 2T_{\text{м}} / t_{\text{п0}} = 1428 \cdot 2 \cdot 0,03 / 1,0 = 86 \text{ Дж.}$$

При плавном нарастании напряжения снижение потерь  $t_{\text{п0}} / 2T_{\text{м}} = 1 / 2 \cdot 0,03 = 16,7$  раза.

**Задача 8.7.** Для АД (см. данные задачи 8.5) определить переменные потери энергии в двигателе при динамическом торможении и реверсе вхолостую и при номинальном моменте нагрузки  $M_{\text{г}} = M_{\text{ном}}$ , считая, что при торможении и реверсе двигатель развивает момент  $M_{\text{ср}} = 207 \text{ Н} \cdot \text{м} = \text{const}$ .

**Задача 8.8.** Двухскоростной АД типа 4А180S4/2 имеет следующие паспортные данные:  $P_{\text{ном}} = 22 / 26,5 \text{ кВт}$ ;  $n_{\text{ном}} = 2920 \text{ об/мин}$ ;  $n_{2\text{ном}} = 1470 \text{ об/мин}$ ;  $J = 0,21 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Сопоставить переменные потери в его роторе при прямом и ступенчатом пуске вхолостую.

### 8.3. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В общем случае, когда ЭП работает в некотором цикле с различными скоростями или нагрузками на валу как в установившемся, так и переходном режимах, цикловой (или средневзвешенный) КПД

$$\eta_{\text{ц}} = A_{\text{пол}} / A_{\text{потр}} = A_{\text{пол}} / (A_{\text{пол}} + \Delta A) = \sum_1^n P_{\text{пол}} t_i / \left( \sum_1^n P_{\text{пол}} t_i + \sum_1^n \Delta P_i t_i \right), \quad (8.29)$$

где  $A_{\text{пол}}$ ,  $A_{\text{потр}}$  – соответственно полезная механическая и потребленная электрическая энергия,  $\Delta A$  – потери энергии;  $P_{\text{пол}i}$  – полезная механическая мощность на  $i$ -м участке цикла;  $\Delta P_i$  – потери мощности на  $i$ -м участке цикла;  $n$  – число участков работы ЭП.

Если ЭП работает в установившемся режиме, то формула (8.29) упрощается и принимает вид

$$\eta = P_{\text{пол}} / (P_{\text{пол}} + \Delta P). \quad (8.30)$$

КПД ЭП как электромеханической системы определяется произведением КПД преобразовательного устройства, управляющего устройства, электродвигателя и механической передачи:

$$\eta = \eta_{\text{п.у}} \cdot \eta_{\text{у.у}} \cdot \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{м.п}}. \quad (8.31)$$

Определив по формуле (8.29) КПД отдельных элементов ЭП, по (8.31) находят КПД ЭП в целом.

Определяющим в выражении (8.31) является КПД двигателя, который рассмотрим подробнее.

Рис. 8.2, а иллюстрирует закономерность изменения номинального КПД электрических двигателей постоянного и переменного тока в зависимости от их номинальной мощности  $P_{\text{ном}}$  и скорости  $\omega_{\text{ном}}$ . Как видно, с ростом уровня номинальной мощности номинальный КПД растет, что объясняется уменьшением потерь мощности относительно полезной мощности двигателя. Двигатели с более высокой скоростью (кривые 1...3 соответственно  $\omega_0 = 314; 157; 105$  рад/с) имеют при той же номинальной мощности более высокий номинальный КПД. Таким образом, более мощные и скоростные двигатели характеризуются и более высокими номинальными КПД.

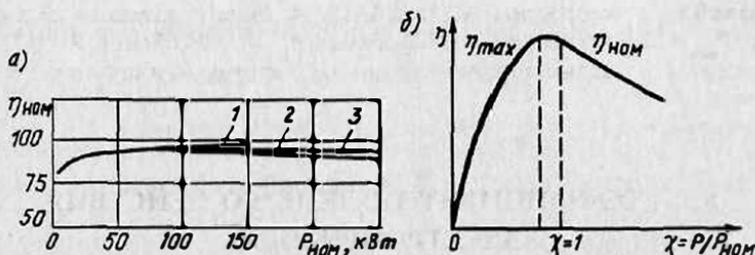


Рис. 8.2

КПД работающего двигателя зависит от развиваемой им полезной механической мощности на валу. При малых нагрузках КПД двигателя небольшой (см. рис. 8.2, б), по мере увеличения нагрузки он растет, достигая максимального значения  $\eta_{\text{max}}$  при мощности, несколько меньшей номинальной.

Способы повышения КПД двигателей могут быть следующими: ограничение времени работы двигателя на холостом ходу; обеспечение нагрузки двигателя при работе, близкой к номинальной (в том числе путем замены малозагруженного двигателя на двигатель

меньшей мощности, что необходимо обосновать экономически, т. е. капитальные затраты на замену должны окупиться за счет сокращения эксплуатационных расходов); применение регулятора экономичности (см. разд. 5.5); снижение потерь энергии в переходных режимах. В регулируемых ЭП должны применяться способы, характеризующиеся малыми потерями мощности, например частотное регулирование скорости асинхронных и синхронных двигателей.

**Задача 8.9\*.** Рассчитать КПД двигателя типа 2ПН-132 при его работе в заданном цикле (см. данные задачи 8.2).

Поскольку двигатель работает с переменной нагрузкой на валу, КПД рассчитывается по формуле (8.29).

Определим по (8.7) полные потери мощности в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}}) / \eta_{\text{ном}} = 5500(1 - 0,8) / 0,8 = 1357 \text{ Вт},$$

и постоянные потери мощности:

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}} = 1375 - 508 = 867 \text{ Вт}.$$

Скорости ДПТ, соответствующие моментам нагрузки на отдельных участках цикла, рассчитываются по формуле (4.5). Поэтому предварительно определяем

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 5500 / 157 = 35 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$k\Phi_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} / I_{\text{ном}} = 5500 / (157 \cdot 59) = 0,6 \text{ В} \cdot \text{с};$$

$$\omega_0 = U_{\text{ном}} / k\Phi_{\text{ном}} = 110 / 0,6 = 183 \text{ рад / с}.$$

Тогда  $\omega_{c1} = \omega_0 - M_{c1} R_{\text{я}} / (k\Phi_{\text{ном}})^2 = 183 - 0,6 \cdot 35 \cdot 0,146 / (0,6)^2 = 167 \text{ рад / с};$

$$\omega_{c2} = \omega_{\text{ном}} = 157 \text{ рад / с}; \quad \omega_{c3} = 162 \text{ рад / с}.$$

Учитывая, что  $P_{\text{пол}} = P_{\text{мех}} = M_c \omega_c$ , а  $\Delta P = K + V$ , находим

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ц}} &= \left( \sum_1^3 M_{c1} \omega_{c1} t_1 \right) / \left( \sum_1^3 M_{c1} \omega_{c1} t_1 + K \sum_1^3 t_i + \sum_1^3 V_i t_i \right) = \\ &= (21 \cdot 167 \cdot 600 + 35 \cdot 157 \cdot 180 + 28 \cdot 162 \cdot 900) / (7167 \cdot 10^3 + 867 \cdot 1680 + \\ &+ 0,146 \cdot [(0,6 \cdot 59)^2 \cdot 600 + 59^2 \cdot 180 + (0,8 + 59)^2 \cdot 900]) = 0,83. \end{aligned}$$

**Задача 8.10.** Рассчитать КПД двигателя типа 4АН160S4 при его работе в заданной точке (см. данные задачи 8.1).

#### 8.4. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ЭП, подключаемые к сети переменного тока, потребляют из нее активную  $P_2$  и реактивную  $Q$  мощности. Активная мощность расходуется на полезную работу ЭП и покрытие потерь в нем, а реактивная мощность, обеспечивая создание электромагнитных полей двигателя и других его элементов, непосредственно полезной рабо-

ты не совершает. Отметим, что в отношении реактивной мощности точнее говорить не о потреблении ее, а об обмене (циркуляции) между сетью и двигателем.

Работа ЭП, как и любого другого потребителя активной и реактивной энергии, характеризуется коэффициентом мощности

$$\cos \varphi = P_a / S = P_a / \sqrt{P_a^2 + Q^2}, \quad (8.32)$$

где  $S$  – полная (или кажущаяся) мощность.

Угол  $\varphi$ , как известно из электротехники, определяет сдвиг фаз между напряжением сети и током ЭП: если он потребляет реактивную мощность, то сдвиг фаз  $\varphi \neq 0$  и  $\cos \varphi \neq 1$ . Если ЭП реактивную мощность не потребляет, то  $\varphi = 0$  и  $\cos \varphi = 1$ .

ЭП, потребляя реактивную мощность, нагружает ею систему электроснабжения, вызывая дополнительные потери напряжения и энергии в ее элементах. По этой причине всегда следует стремиться к обеспечению максимально возможного  $\cos \varphi$  ЭП как одного из основных энергетических показателей его работы.

Если ЭП работает в каком-то цикле при различных нагрузках или скоростях в установившемся и переходном режимах, то он как потребитель реактивной энергии характеризуется средневзвешенным или цикловым коэффициентом мощности, который определяется отношением потребленной активной энергии за цикл  $A_a$  к полной или кажущейся энергии  $A_n$  в соответствии с формулой

$$\cos \varphi_{\text{ц}} = A_a / A_n = \sum_{i=1}^n P_{ai} t_i / \sum_{i=1}^n S_i t_i, \quad (8.33)$$

где  $S_i = \sqrt{P_{ai}^2 + Q_i^2}$ .

Коэффициентом мощности характеризуется работа ЭП с двигателями переменного тока (АД и СД), а также системы ЭП постоянного тока «управляемый выпрямитель – двигатель постоянного тока».

**Коэффициент мощности АД.** Активная  $P_a$  и реактивная  $Q$  мощности применительно к установившемуся режиму работы трехфазного АД могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$P_a = P_1 = P_{\text{мех}} + \Delta P = M\omega + K + V_1 + V_2; \quad (8.34)$$

$$Q = 3I_{\mu}^2 x_{\mu} + 3I_1^2 x_1 + 3I_2'^2 x_2'. \quad (8.35)$$

Для П-образной схемы замещения АД (см. рис. 5.2) при  $R_{\mu} = 0$  и  $I_{\mu} = U_{\phi} / x_{\mu}$  формулу (8.35) можно записать в следующем виде:

$$Q = 3U_{\phi} I_{\mu} + 3I_2'^2 x_{\kappa} = 3U_{\phi} I_{\mu} + M\omega_0 s x_{\kappa} / R_2'. \quad (8.36)$$

На рис. 8.3, а приведены зависимости номинального коэффициента мощности АД от различных номинальных мощностей  $P_{\text{ном}}$  и чисел пар полюсов  $p$  (кривая 1 при  $p_1=1$ , кривая 2 при  $p=4$ ). Характерным для них является более высокое значение  $\cos \varphi_{\text{ном}}$  для двигателей с большими номинальными мощностями и скоростями вращения.

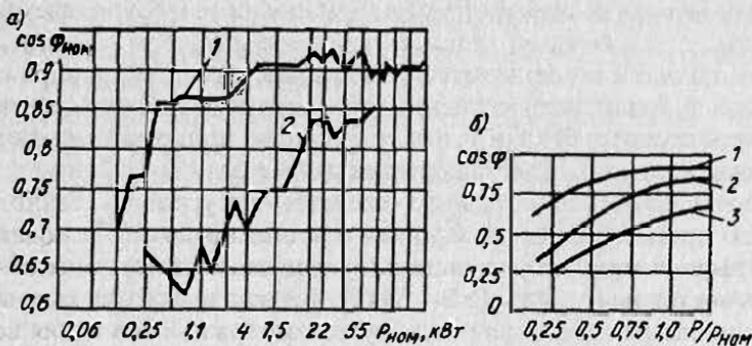


Рис. 8.3

Для большинства АД  $\cos \varphi_{\text{ном}} \approx 0,8 \dots 0,9$ . Для этих значений  $Q = (0,5 \dots 0,75) P_1$ , т.е. АД на каждый киловатт активной мощности потребляет из сети  $0,5 \dots 0,75$  кВ·А реактивной мощности и чем ниже  $\cos \varphi$ , тем большую реактивную мощность потребляет АД из сети, загружая ее дополнительным током и вызывая дополнительные потери.

Коэффициент мощности АД существенно зависит от его нагрузки. При холостом ходе АД коэффициент мощности невелик, так как при этом относительно велика доля реактивной мощности по сравнению с активной. По мере увеличения нагрузки АД возрастает и  $\cos \varphi$ , достигая своего максимального значения примерно в области ее номинальных значений. Зависимость  $\cos \varphi$  от кратности механической нагрузки  $P/P_{\text{ном}}$  для АД серии 4А при различных номинальных значениях  $\cos \varphi_{\text{ном}}$  приведена на рис. 8.3, б.

АД являются основными потребителями реактивной мощности в системе электроснабжения, поэтому повышение коэффициента их мощности представляет собой важную технико-экономическую задачу. В настоящее время существуют несколько способов повышения  $\cos \varphi$  АД.

Замена малозагруженных АД двигателями меньшей мощности, что иллюстрируется кривыми 1...3, построенными соответственно при  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9; 0,8$  и  $0,6$  (см. рис. 8.3, б). При замене АД меньшей мощности будет работать в области больших нагрузок с более высоким  $\cos \varphi$ . Напомним, что и КПД полностью загруженного дви-

гателя будет высоким. Замена двигателя, как любая модернизация ЭП, должна быть экономически обоснована.

*Ограничение времени работы АД на холостом ходу*, т.е. работы с низким  $\cos \varphi$ . Для этого двигатель отключается от сети при его работе вхолостую автоматически или оператором.

*Понижение напряжения питания АД*, работающих с малой или переменной нагрузкой. При этом уменьшаются потребляемый из сети ток и реактивная мощность и повышается  $\cos \varphi$ . Реализация этого способа осуществляется с помощью регулятора напряжения (см. разд. 5.5) или, когда это возможно, переключением обмоток статора со схемы треугольника на звезду, что приводит к снижению напряжения на обмотке каждой фазы в  $\sqrt{3}$  раз.

*Замена АД на СД*, когда это возможно по условиям технологического процесса рабочей машины и экономически обосновано.

**Коэффициент мощности системы «управляемый выпрямитель – двигатель постоянного тока» (УВ – ДПТ).** Так как в этой системе напряжение на якоре двигателя регулируется задержкой открытия вентилей управляемого выпрямителя, происходит сдвиг фазы тока ЭП по отношению к напряжению сети и он начинает потреблять реактивную мощность из сети. Кроме того, работа системы УВ – ДПТ вызывает искажение синусоидальной формы напряжения системы электроснабжения, оказывая вредное воздействие на другие ЭП, что выражается в повышенном нагреве электродвигателей, снижении их мощности и КПД, усилении вибрации и шума при работе.

Искажение синусоидальной формы напряжения приводит к появлению высших гармоник напряжения, которые нарушают нормальную работу других потребителей электроэнергии, устройств автоматики, защиты и сигнализации, создает помехи в линиях связи. Несинусоидальность напряжений и токов приводит к дополнительным погрешностям измерительных приборов, а также оказывает отрицательное воздействие и на батареи конденсаторов, применяемых для компенсации реактивной мощности, вызывая их перегрузку по току и напряжению.

Коэффициент мощности системы УВ – ДПТ определяется двумя факторами: углом  $\varphi_1$  сдвига основной первой гармоники потребляемого из сети тока относительно напряжения сети и коэффициентом искажения  $\nu$  этого же тока:

$$\cos \varphi = \nu \cos \varphi_1, \quad (8.37)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos(\alpha + \gamma/2), \quad (8.38)$$

где  $\nu = I_1/I$  – коэффициент искажения;  $I$  – действующее значение потребляемого из сети тока;  $I_1$  – действующее значение первой гар-

моники этого тока;  $\alpha$ ,  $\gamma$  – соответственно углы управления и коммутации вентиляей.

Из приведенных выражений следует, что коэффициент мощности вентильного ЭП постоянного тока зависит от скорости двигателя, определяемой углом управления вентиляей  $\alpha$ , и его нагрузки, определяющей угол коммутации  $\gamma$ . Снижение скорости (увеличение диапазона регулирования) или увеличение нагрузки приводит к уменьшению коэффициента мощности ЭП. Анализ зависимости  $\cos \varphi$  вентильного ЭП от относительной скорости  $\omega^* = \omega/\omega_{0e}$  при номинальной нагрузке на валу двигателя (рис. 8.4, а) показывает, что уменьшение коэффициента мощности происходит пропорционально снижению скорости, т.е. увеличению диапазона регулирования. Это видно также и из следующего приближенного выражения для коэффициента мощности при регулировании скорости:

$$\cos \varphi_p \approx \cos \alpha = E_d/E_{d\max} = \omega_0/\omega_{0e}, \quad (8.39)$$

где  $E_d$  – ЭДС преобразователя;  $\omega_0$  – скорость идеального холостого хода, соответствующая  $E_d$ .

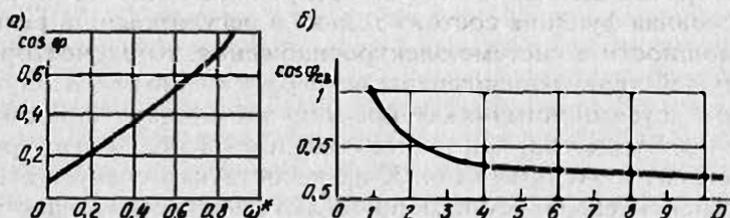


Рис. 8.4

При регулировании скорости с одинаковым временем работы двигателя на каждой скорости при  $M_c = \text{const}$  зависимость средневзвешенного циклового коэффициента мощности  $\cos \varphi_{ср}$  от диапазона регулирования  $D$  показана на рис. 8.4, б).

*Повышение коэффициента мощности и уменьшение несинусоидальности напряжения сети при работе системы УВ – ДПТ может быть достигнуто несколькими способами:*

за счет применения фильтрокомпенсирующих и фильтросимметрирующих устройств, обеспечивающих одновременно компенсацию реактивной мощности, фильтрацию высших гармоник и уменьшение отклонений напряжения по фазам. Эти устройства целесообразно размещать в узле подключения ЭП к электрической сети. Состоят они из управляемого компенсатора, обеспечивающего регулирование реактивной мощности и выполняемого обычно на основе специального тиристорного преобразователя, и энергетичес-

кого фильтра, который служит для фильтрации высших гармоник тока ЭП, а также компенсации реактивной мощности. Энергетические фильтры представляют собой последовательные индуктивно-емкостные резонансные цепи, настроенные на частоты высших гармоник вентиляльных ЭП (нагрузок). Число параллельно включенных резонансных цепей фильтров должно быть таким, чтобы коэффициент несинусоидальности напряжения был не более 5%. Для каждой высшей гармоники используется свой фильтр;

путем использования традиционных компенсирующих устройств, к числу которых относятся синхронные двигатели и компенсаторы, батареи конденсаторов, а также тиристорные источники реактивной мощности. Синхронные двигатели являются эффективным и удобным средством компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения. Выполняя свою основную функцию приводного электродвигателя, СД одновременно могут генерировать в сеть реактивную мощность, т.е. работать с опережающим  $\cos \varphi$ , что обеспечивается соответствующим регулированием их тока возбуждения (см. разд. 6.4). Синхронные компенсаторы представляют собой СД, работающие без нагрузки. Их основная функция состоит только в регулировании реактивной мощности в системе электроснабжения. Конденсаторы по своему действию эквивалентны перевозбужденным СД, по сравнению с другими источниками реактивной мощности они имеют такие преимущества, как малые потери этой мощности, простота монтажа и эксплуатации. К их недостаткам следует отнести зависимость генерируемой мощности от напряжения, недостаточную стойкость при перегрузках по току и напряжению, а также ухудшение их работы в сетях с повышенным содержанием высших гармоник. Тиристорные источники реактивной мощности строятся с использованием преобразователей, имеющих искусственную коммутацию вентилей. Такой преобразователь имеет на стороне выпрямленного тока реактор (индуктивный накопитель энергии) или батарею конденсаторов (емкостный накопитель энергии). Сочетание преобразователя с реактивным элементом позволяет создать устройство для регулирования реактивной мощности в системе энергоснабжения;

путем использования специальных законов управления УВ и способов коммутации их вентилей, к числу которых относятся поочередное и несимметричное управление преобразователями, а также искусственная коммутация вентилей преобразователей. Сущность этих способов рассмотрена в [12].

Задача 8.11\*. АД типа МТКН 412-6 имеет следующие паспортные данные:  
 $P_{ном} = 36$  кВт при продолжительности включения ПВ = 25%;  $n_{ном} = 920$  об/мин;  
 $I_{ном} = 81$  А;  $I_{\mu} = I_{1хх} = 41,5$  А;  $R_1 = 0,13$  Ом;  $x_1 = 0,2$  Ом;  $R_2' = 0,24$  Ом;  $x_2' = 0,25$  Ом.

Определить коэффициент мощности при его работе на естественной характеристике с моментом нагрузки  $M_c = 0,5 M_{ном}$ .

Расчет  $\cos \varphi$  производится по формуле (8.32), для чего предварительно определим скорости в режимах идеального холостого хода и при номинальной нагрузке двигателя:

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 3 = 105 \text{ рад / с};$$

$$\omega_{ном} = \pi n_{ном} / 30 = 3,14 \cdot 920 / 30 = 96,3 \text{ рад / с};$$

номинальные скольжение и момент двигателя :

$$s_{ном} = (\omega_0 - \omega_{ном}) / \omega_0 = (105 - 96,3) / 105 = 0,08;$$

$$M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном} = 36000 / 96,3 = 374 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

скольжение на естественной характеристике, соответствующее моменту нагрузки  $M_c = 0,5 M_{ном} = 0,5 \cdot 374 = 187 \text{ Н} \cdot \text{м}$ :

$$s_c = s_{ном} M_c / M_{ном} = 0,08 \cdot 0,5 = 0,04.$$

По формуле (5.7) определим приведенный ток в роторе АД при моменте нагрузки  $M_c = 187 \text{ Н} \cdot \text{м}$ :

$$I'_2 = \sqrt{M_c \omega_0 s_c / (3R'_2)} = \sqrt{187 \cdot 105 \cdot 0,04 / (3 \cdot 0,24)} = 33 \text{ А}.$$

По (8.34) найдем номинальную активную потребляемую мощность из сети:

$$P_{ном} = 3U_{1\phi} I_{ном} \cos \varphi_{ном} = 3 \cdot 220 \cdot 81 \cdot 0,82 = 43873 \text{ кВт}.$$

Вычислим полные номинальные потери мощности:

$$\Delta P_{ном} = P_{ном} - P_{ном} = 43873 - 36000 = 7873 \text{ Вт}.$$

Найдем номинальный приведенный ток ротора:

$$I'_{2ном} = \sqrt{M_{ном} \omega_0 s_{ном} / (3R'_2)} = \sqrt{374 \cdot 105 \cdot 0,08 / (3 \cdot 0,24)} = 66 \text{ А}.$$

Постоянные потери мощности

$$K = \Delta P_{ном} - V_{1ном} - V_{2ном} = 7837 - 3 \cdot 81^2 \cdot 0,13 - 3 \cdot 66^2 \cdot 0,24 = 2142 \text{ Вт}.$$

Потребляемая активная мощность при заданном моменте нагрузки

$$P_a = M_c \omega_c + K + V_{1c} + V_{2c} = 187 \cdot 105(1 - 0,04) + 2142 + 3 \cdot 33^2(0,13 + 0,24) = 22200 \text{ Вт}.$$

По (8.35) реактивная мощность

$$Q = 3U_{1\phi} I_{1x.x} + 3I_2^2 x_c = 3 \cdot 220 \cdot 41,5 + 3 \cdot 33^2 \cdot 0,45 = 28860 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

По (8.32) искомый коэффициент мощности при работе АД в заданной точке

$$\cos \varphi = P_a / \sqrt{P_a^2 + Q^2} = 22200 / \sqrt{22200^2 + 28860^2} = 0,57.$$

Задача 8.12. Двигатель МТКН 412-6 (см. данные задачи 8.11) работает в течение 7 мин с моментом нагрузки  $M_{cl} = 0,9M_{ном}$ , в течение 12 мин – с моментом  $M_{cl} = 0,4M_{ном}$  и в течение 4 мин – с моментом  $M_{cl} = M_{ном}$ . Определить средневзвешенный коэффициент мощности АД за этот цикл работы.

## 8.5. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Эффективное использование энергии является одной из важнейших современных проблем народного хозяйства. Ее решение позволит снизить расход энергетических и материальных ресурсов при производстве промышленной и сельскохозяйственной продукции, уменьшить большие непроизводительные расходы государства и населения в сфере жилищно-коммунального хозяйства, улучшить экологическую обстановку в стране. Важную роль в решении этой проблемы играет ЭП, который является основным потребителем электрической энергии.

Энергосбережение может осуществляться как в самом ЭП, так и в обслуживаемых им технологических процессах, как на стадии проектирования и конструирования, так и при его эксплуатации.

Проектирование и конструирование ЭП должны определяться современным уровнем развития теории и практики ЭП и смежных областей науки и техники – электромеханики, электроники, автоматики, механики и вычислительной техники. Основные методы энергосбережения на этом этапе следующие:

1. Обоснованный расчет требуемой мощности двигателя, ИО рабочей машины или производственного механизма с учетом всех условий работы. В разд. 8.3 и 8.4 было показано, что двигатель с завышенной мощностью имеет низкие энергетические показатели работы и в этом случае происходит недоиспользование заложенных в него материальных ресурсов. С другой стороны, применение двигателя недостаточной мощности снижает производительность технологического оборудования, приводит к перегрузке двигателя и преждевременному выходу его из строя. Подробно расчет мощности и выбор двигателя рассмотрены в гл. 9.

2. Выбор компонент ЭП, имеющих при работе минимальные потери энергии. В первую очередь это относится к двигателям, которые должны иметь максимально возможные коэффициенты полезного действия и мощности.

3. Выбор способов и технических средств регулирования координат ЭП, при использовании которых потери мощности и энергии минимальны. Например, регулирование скорости двигателей переменного тока с помощью полупроводниковых преобразователей частоты, рассмотренное в разд. 5.6 и 6.3.

При эксплуатации работающих ЭП энергосбережение достигается за счет правильного технического обслуживания и проведения мероприятий по модернизации.

Техническое обслуживание ЭП должно проводиться персоналом в соответствии с правилами эксплуатации электроустановок и предусматривать периодические осмотры элементов привода и различные профилактические мероприятия – смазку подшипников и других движущихся механических частей, очистку коллекторов и контактных колец двигателей и контактов электрической аппаратуры, затяжку болтовых электрических соединений и др.

Модернизация ЭП (см. разд. 8.3 и 8.4) должна предусматривать технические мероприятия, позволяющие повысить энергетические показатели приводов при эксплуатации: замену малозагруженных двигателей, ограничение или полное исключение их работы на холостом ходу, снижение напряжения на статоре АД при малых нагрузках, компенсацию реактивной мощности и др. Повторим, что любая модернизация обязательно должна сопровождаться оценкой ожидаемого технико-экономического эффекта от ее осуществления.

Эффективным средством энергосбережения является переход от нерегулируемого ЭП к регулируемому за счет использования полупроводниковых силовых преобразователей. Эта мера позволяет осуществлять энергосбережение как в самом ЭП, так и в обслуживаемых им технологических процессах. Рассмотрим в качестве примера возможности энергосбережения в асинхронном ЭП при малых нагрузках с помощью регулятора напряжения.

В разд. 5.5 была показана возможность снижения потребляемого АД из сети тока (см. рис. 5.13) при снижении подводимого к нему напряжения. За счет регулирования напряжения на статоре АД при малых нагрузках или холостом ходе [25,26] могут быть снижены ток,

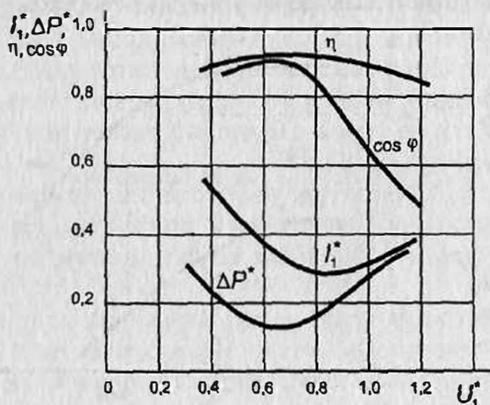


Рис. 8.5

потребляемая из сети мощность, потери мощности или повышены его КПД и  $\cos \varphi$ . На рис. 8.5 для примера показаны построенные для двигателя типа 4А 180 М4 мощностью 30 кВт зависимости  $\eta$ ,  $\cos \varphi$ , относительного тока статора  $I_1^* = I_1 / I_{1\text{ном}}$  и потерь мощности  $\Delta P^* = \Delta P / \Delta P_{\text{ном}}$  от относительного напряжения на статоре  $U_1^* = U_1 / U_{1\text{ном}}$  при моменте нагрузки, составляющем 20% от номиналь-

ного. Из приведенных кривых видно, что наибольших значений эти переменные достигают при напряжениях 60...80% от номинального, причем точки экстремума в общем случае не совпадают.

Повышение значений переменных до экстремального уровня происходит в зависимости от типа АД на несколько единиц или десятков процентов, что в случае больших мощностей двигателей или продолжительных периодов их работы с небольшими нагрузками может дать заметный экономический эффект.

Экстремальные значения переменных достигаются при работе АД с определенными оптимальными скольжениями. Так, для обеспечения минимума потребляемого тока при любых нагрузках АД его скольжение должно поддерживаться на уровне

$$s_{opt} = R'_2 / x_{\mu} \quad (8.39)$$

Формулы для расчета оптимальных скольжений при оптимизации других переменных приведены в [25]. Поддержание скольжения на требуемом оптимальном уровне обеспечивается в системе с отрицательной обратной связью по скорости (см. рис. 11.30).

Применение регулируемого ЭП позволяет обеспечить энергосбережение в целом ряде технологических процессов, иногда во много раз превосходящее экономию энергии в самом ЭП. Например, регулирование скорости ленты транспортера с помощью ЭП, подающего детали в закалочную печь, позволяет минимизировать количество тепловой энергии на закалку в зависимости от их сортамента, технологии заковки и других факторов. Весьма эффективно регулируемый по скорости ЭП может обеспечить энергосбережение в таких рабочих машинах, как насосы, вентиляторы и компрессоры. Поскольку эти рабочие машины являются очень распространенными в промышленности, на транспорте, в сельском и жилищно-коммунальном хозяйствах и потребляют до 40% всей производимой электроэнергии, энергосбережение в этом случае оказывается очень эффективным.

Рассмотрим эффект энергосбережения на примере ЭП центробежного насоса. Основной характеристикой насоса является зависимость создаваемого им напора (давления)  $H$  от расхода воды  $Q$ . На рис. 8,6 показаны характеристики  $H = f(Q)$  для двух скоростей приводного двигателя — номинальной  $\omega_{ном}$  и пониженной  $\omega_1$ .

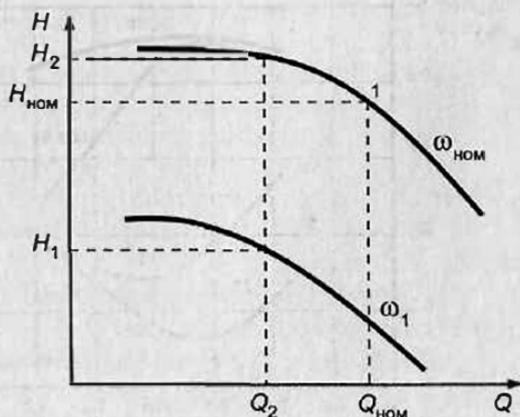


Рис. 8.6

Особенностью работы большинства насосных установок является изменение количества (расхода) подаваемой ими жидкости в течение времени. Например, потребление воды в жилых зданиях меняется в течении суток и имеет два максимума – утренний и вечерний. Допустим, что в исходном положении насос работал с номинальным расходом  $Q_{ном}$  и напором  $H_{ном}$  в точке 1. При снижении расхода воды до значения  $Q_2$  при неизменной скорости ЭП напор в соответствии с характеристикой возрастет до значения  $H_2$ . При этом будет потребляться из сети мощность

$$P_2 = H_2 Q_2 / (\eta_n \eta_{ЭП}), \quad (8.40)$$

где  $\eta_n, \eta_{ЭП}$  – соответственно КПД насоса и ЭП.

Тот же расход воды можно обеспечить при меньшем напоре  $H_1$ , если с помощью ЭП снизить скорость двигателя до уровня  $\omega_1$ . В этом случае из сети будет потребляться меньшая мощность

$$P_1 = H_1 Q_2 / (\eta_n \eta_{ЭП}).$$

Экономия электроэнергии (ЭЭ) за время работы  $T_p$  насоса с расходом  $Q_2$  при этом

$$\text{ЭЭ} = Q_2 T_p (H_2 - H_1) / (\eta_n \eta_{ЭП}).$$

Примеры использования регулируемого ЭП насосов показывают, что экономия электроэнергии может достигать до 50% и более в зависимости от вида и режимов работы насосных установок. Кроме того, при работе сетей с меньшими напорами значительно меньше утечки воды в сетях и арматуре (на 15...20% и более). В насосах с ЭП переменного тока при регулировании скорости двигателей обычно применяются статические преобразователи частоты.

#### Контрольные вопросы

1. Назовите энергетические показатели ЭП.
2. Что входит в состав постоянных и переменных потерь мощности?
3. Как связаны между собой потери мощности и энергии?
4. Почему расчет потерь мощности и энергии в якоре ДПТ и роторе АД может быть выполнен по одной формуле?
5. Как упрощенно учитывается нагрузка ЭП при расчете потерь энергии в переходных процессах?
6. Что дает применение датчика интенсивности в системе П-Д с точки зрения снижения потерь энергии?
7. Какие существуют способы снижения потерь энергии в переходных процессах ЭП?
8. Что такое средневзвешенный КПД?
9. Каким образом можно повысить КПД ЭП?

10. Что такое коэффициент мощности?
11. Какими путями можно достичь повышения коэффициента мощности ЭП?
12. В чем важность задачи эффективного использования энергии?
13. Какие технические мероприятия позволяют осуществлять энергосбережение средствами ЭП при его эксплуатации или модернизации?

## **Глава 9. ВЫБОР И ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЕЙ И РЕЗИСТОРОВ**

При создании (проектировании) новых ЭП или модернизации уже существующих выбирают такие серийно выпускаемые двигатели и резисторы, которые обеспечивали бы наилучшее выполнение возлагаемых на них функций и соответствовали бы условиям работы привода и рабочей машины. Их паспортные (номинальные) данные (мощность, напряжение, ток, частота и др.) должны быть близки к расчетным при работе данного ЭП, а конструктивное исполнение должно соответствовать способу его размещения и условиям окружающей среды.

Основным элементом любого ЭП является двигатель. Именно его данными определяется выбор других элементов – преобразователей, коммутационной аппаратуры, резисторов, элементов защиты и др. По этой причине расчету мощности и выбору двигателя в этой главе уделяется основное внимание.

### **9.1. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ**

Основным требованием при выборе электродвигателя является его соответствие условиям технологического процесса рабочей машины. Задача выбора состоит в поиске такого двигателя, который будет обеспечивать заданный технологический цикл рабочей машины, иметь конструкцию, соответствующую условиям эксплуатации и компоновки с рабочей машиной, а его нагрев при этом не должен превышать нормативный (допустимый) уровень.

Выбор двигателя недостаточной мощности может привести к нарушению заданного технологического цикла и снижению производительности рабочей машины. Происходящие при этом его повышенный нагрев и ускоренное старение изоляции определяют преждевременный выход самого двигателя из строя, останов рабочей машины и соответствующие экономические потери.

Недопустимым является также использование двигателей завышенной мощности, так как при этом, имея повышенную первоначальную стоимость, ЭП работает с низкими КПД и коэффициен-

том мощности. Таким образом, обоснованный выбор электродвигателя во многом определяет технико-экономические показатели работы комплекса «ЭП – рабочая машина».

Выбор электродвигателя производится обычно следующим образом: сначала рассчитывается требуемая мощность, а затем предварительно выбранный двигатель проверяется по условиям пуска, перегрузке и нагреву. Если он удовлетворяет условиям проверки, то на этом выбор заканчивается, если же не удовлетворяет, то выбирается другой двигатель (как правило, большей мощности) и проверка повторяется.

При проектировании вновь создаваемого ЭП одновременно с выбором двигателя должны производиться расчет передаточного числа (радиуса приведения) и выбор механической передачи между двигателем и исполнительным органом рабочей машины. В данной главе рассматривается более простая задача – выбор двигателя при известных механической передаче, ее передаточном числе (или радиусе приведения) и КПД.

Основой для расчета мощности и выбора электродвигателя являются нагрузочная диаграмма и диаграмма скорости (тахограмма) исполнительного органа рабочей машины.

**Нагрузочная диаграмма** исполнительного органа рабочей машины представляет собой график изменения приведенного к валу двигателя статического момента нагрузки во времени  $M_c(t)$ . Эта диаграмма рассчитывается на основании технологических данных, характеризующих работу машин и механизмов, и параметров механической передачи. Для примера приведем формулы, по которым можно рассчитать моменты сопротивления  $M_c$ , создаваемые на валу двигателя при работе исполнительных органов некоторых машин и механизмов.

*При работе механизма подъемной лебедки*

$$M_c = GR / (i\eta), \quad (9.1)$$

где  $G$  – сила тяжести поднимаемого груза, Н;  $R$  – радиус барабана подъемной лебедки, м;  $i, \eta$  – соответственно передаточное число и КПД механической передачи.

*При работе механизма передвижения подъемных кранов*

$$M_c = k_1 G \mu r + f / (i\eta), \quad (9.2)$$

где  $G$  – сила тяжести перемещаемой массы, Н;  $k_1 = 1,8 \dots 2,5$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления движению из-за трения реборд ходовых колес о рельсы;  $\mu = 0,015 \dots 0,15$  – коэффициент трения в опорах ходовых колес;  $f = (5 \dots 12) \cdot 10^{-4}$  – коэффициент трения качения ходовых колес по рельсам, м;  $r$  – радиус шейки оси ходового колеса, м.

При работе вентиляторов

$$M_c = k_3 Q H / (\eta_b \omega_b \eta_i), \quad (9.3)$$

где  $Q$  – производительность вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – напор (давление) газа, Па;  $\eta_b = 0,4 \dots 0,85$  – КПД вентилятора;  $\omega_b$  – скорость вентилятора, рад/с;  $k_3 = 1,1 \dots 1,5$  – коэффициент запаса.

При работе насосов

$$M_c = k_3 g \rho Q (H_c + \Delta H) / (\eta_n \omega_n \eta_i), \quad (9.4)$$

где  $Q$  – производительность насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H_c$  – статический напор, м;  $\Delta H$  – потери напора в трубопроводе, м;  $g = 9,81$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $k_3 = 1,1 \dots 1,3$  – коэффициент запаса;  $\eta_n = 0,45 \dots 0,75$  – КПД насоса;  $\omega_n$  – скорость насоса, рад/с.

Диаграмма скорости, или тахограмма, представляет собой зависимость скорости движения исполнительного органа от времени  $V_{\text{ио}}(t)$  или  $\omega_{\text{ио}}(t)$ . После выполнения операции приведения эти зависимости изображаются в виде графика изменения скорости вала двигателя во времени  $\omega(t)$ .

На рис. 9.1, а приведен пример нагрузочной диаграммы, которая показывает, что некоторый исполнительный орган создает при своей работе в течение времени  $t_1$  момент нагрузки  $M_{c1}$ , а в течение времени  $t_2$  – момент нагрузки  $M_{c2}$ . Из тахограммы (см. рис. 9.1, б) видно, что его движение состоит из участков разгона, движения с установившейся скоростью, торможения и паузы. Продолжительности этих участков соответственно равны  $t_p$ ,  $t_y$ ,  $t_r$ ,  $t_0$ , а полное время цикла  $t_{\text{ц}} = t_p + t_y + t_r + t_0 = t_1 + t_2$ .

Порядок расчета мощности, предварительного выбора и проверки двигателя рассмотрим на примере этих диаграмм.

**Определение расчетной мощности двигателя. Ориентировочно расчетный момент двигателя**

$$M_{\text{расч}} \geq k_3 M_{c.э}, \quad (9.5)$$

где  $M_{c.э}$  – эквивалентный момент нагрузки;  $k_3$  – коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы электродвигателя, когда он работает с повышенными токами и моментами.

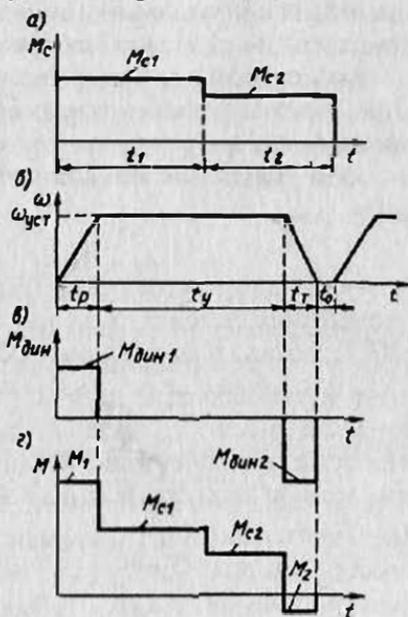


Рис. 9.1

Если момент нагрузки  $M_c$  изменяется во времени и нагрузочная диаграмма имеет несколько участков, как это показано на рис. 9.1, а, то  $M_{с.э}$  определяется как среднеквадратичная величина:

$$M_{с.э} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_{с.э}^2 t_i) / t_{ц}}, \quad (9.6)$$

где  $M_{с.э}$ ,  $t_i$  – соответственно момент и длительность  $i$ -го участка нагрузочной диаграммы.

Для рассматриваемого графика движения расчетная скорость двигателя  $\omega_{расч} = \omega_{уст}$ . Если скорость исполнительного органа регулируется, то расчетная скорость двигателя определяется более сложным путем и зависит от ее способа регулирования [12].

Расчетная мощность двигателя

$$P_{расч} = M_{расч} \omega_{расч} = k_3 M_{с.э} \omega_{уст}. \quad (9.7)$$

### Выбор двигателя и проверка его по перегрузке и условиям пуска.

По каталогу выбираем двигатель с ближайшими большими значениями мощности и скорости. Выбранный двигатель при этом должен по роду и значению напряжения соответствовать параметрам сетей переменного или постоянного тока или силовых преобразователей, к которым он подключается; по конструктивному исполнению – условиям его компоновки с исполнительным органом и способам крепления на рабочей машине, а по способу вентиляции и защиты от действия окружающей среды – условиям его работы.

Выбранный двигатель проверяется по перегрузочной способности. Для этого рассчитывается зависимость его момента от времени  $M(t)$ , т.е. нагрузочная диаграмма двигателя. Она строится с помощью уравнения механического движения (2.15), записанного в виде

$$M = M_c + J d\omega/dt = M_c + M_{дин}. \quad (9.8)$$

Динамический момент  $M_{дин}$  определяется суммарным приведенным моментом инерции  $J$  и заданными ускорением на участке разгона и замедлением на участке торможения диаграммы скорости  $\omega(t)$  (см. рис. 9.1, б). Если считать график  $\omega(t)$  на участках разбега и торможения линейным, то динамические моменты на этих участках можно записать в следующем виде:

$$M_{дин.р} = J \Delta\omega / \Delta t = J \omega_{уст} / t_p = \text{const}; \quad (9.9)$$

$$M_{дин.т} = -J \omega_{уст} / t_T.$$

Зная график динамического момента (см. рис. 9.1, *в*) при постоянных ускорении и замедлении и зависимость  $M(t)$ , построенную на основании (9.8), сопоставим максимально допустимый момент двигателя  $M_{\max}$  с максимальным моментом при разбеге  $M_1$  (см. рис. 9.1, *з*). Для рассматриваемого случая должно выполняться соотношение

$$M_{\max} \geq M_1. \quad (9.10)$$

Если соотношение (9.10) выполняется, то двигатель обеспечит заданное ускорение на участке разгона (см. рис. 9.1), если нет – график движения на этом участке будет отличаться от заданного и необходимо выбрать другой двигатель, если такой график скорости должен быть выполнен обязательно.

Для двигателя постоянного тока обычного исполнения и синхронного двигателя  $M_{\max} = M_{\text{доп}} = (1,5 \dots 2,5)M_{\text{ном}}$ , для АД с фазным ротором этот момент может быть принят примерно равным критическому.

При выборе АД с короткозамкнутым ротором двигатель должен быть проверен также по условиям пуска, для чего сопоставляется его пусковой момент  $M_{\text{п}}$  с моментом нагрузки при пуске  $M_{\text{с.п}}$

$$M_{\text{п}} \geq M_{\text{с.п}}. \quad (9.11)$$

Для рассматриваемого примера  $M_{\text{с.п}} = M_{\text{с1}}$ . Если выбранный двигатель удовлетворяет рассмотренным условиям, то далее осуществляется его проверка по нагреву.

**Задача 9.1\***. Работа ЭП характеризуется рис.9.1, *а, б*, при этом:  $M_{\text{с1}} = 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;  $M_{\text{с2}} = 15 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;  $t_1 = 20 \text{ с}$ ;  $t_2 = 60 \text{ с}$ ;  $t_p = 2 \text{ с}$ ;  $t_r = 1 \text{ с}$ ;  $t_y = 77 \text{ с}$ ;  $\omega_{\text{уст}} = 140 \text{ рад/с}$ ;  $J = 0,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Определить расчетный момент и мощность двигателя и построить его нагрузочную диаграмму.

Расчетный момент двигателя определим по (9.5) с учетом (9.6), а расчетную мощность – по (9.7):

$$M_{\text{расч}} = k_2 M_{\text{с.с}} = 1,2 \sqrt{(40^2 \cdot 20 + 15^2 \cdot 60) / (20 + 60)} = 28,7 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$P_{\text{расч}} = M_{\text{расч}} \omega_{\text{расч}} = 28,7 \cdot 140 = 4006 \text{ Вт} \approx 4 \text{ кВт}.$$

Для построения нагрузочной диаграммы двигателя  $M(t)$  определим сначала динамические моменты на участках разбега  $M_{\text{дин.р}}$  и торможения  $M_{\text{дин.т}}$ :

$$M_{\text{дин.р}} = J \omega_{\text{уст}} / t_p = 0,8 \cdot 140 / 2 = 56 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{дин.т}} = -J \omega_{\text{уст}} / t_r = -0,8 \cdot 140 / 1 = -112 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Моменты двигателя на участках разбега  $M_1$  и торможения  $M_2$  найдем по (9.8):

$$M_1 = M_{c1} + M_{\text{дин.р}} = 40 + 56 = 96 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_2 = M_{c2} + M_{\text{дин.т}} = 20 - 112 = -92 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Моменты двигателя на участках установившегося движения ( $t_1 \dots t_p$ ) и ( $t_2 \dots t_r$ ) равны моментам нагрузки  $M_{c1}$  и  $M_{c2}$ , поскольку динамический момент на них равен нулю.

## 9.2. ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЕЙ ПО НАГРЕВУ ПРЯМЫМ МЕТОДОМ

Электрический двигатель при работе может нагреваться лишь до определенной, допустимой температуры, определяемой в первую очередь нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов. Соблюдение установленных заводом-изготовителем ограничений по допустимой температуре нагрева, заложенных в паспортные данные двигателя, обеспечивает нормативный срок его службы в пределах 15...20 лет. Превышение допустимой температуры ведет к преждевременному разрушению изоляции обмоток и сокращению срока службы электрических двигателей. Так, превышение допустимой температуры нагрева на 8...10°С сокращает срок службы изоляции класса А вдвое.

В современных двигателях применяется изоляция нескольких классов, допустимая (нормативная) температура нагрева которой составляет: класса А – до 105°С, Е – до 120°С, В – до 130°С, F – до 155°С, H – до 180°С, С – свыше 180°С.

В настоящее время при изготовлении электрических двигателей применяется в основном изоляция классов В, F и H.

Сущность проверки двигателя по нагреву состоит в сопоставлении допустимой для него температуры с его температурой при работе. Очевидно, что если рабочая температура не превышает допустимую, то двигатель работает в допустимом тепловом режиме, и наоборот. Обычно оценивается не абсолютная температура, а так называемый перегрев  $\tau$ , который представляет собой разность температур двигателя  $t$  и окружающей среды  $t_{o.c.}$ :  $\tau = t - t_{o.c.}$

При выполнении тепловых расчетов берется стандартная температура окружающей среды, равная 40°С, которой соответствует номинальная мощность двигателя, указанная на его щитке. При более низкой температуре окружающей среды двигатель может быть нагружен несколько выше номинальной мощности, а при более высокой температуре его нагрузка должна быть снижена или следует предпринять меры по дополнительному его охлаждению или замене на более мощный двигатель.

Двигатель будет работать в допустимом тепловом режиме при выполнении условия

$$\tau_{\text{раб}} < \tau_{\text{доп}}, \quad (9.12)$$

где  $\tau_{\text{доп}}$  — допустимый (нормативный) перегрев двигателя, определяемый классом его изоляции;  $\tau_{\text{раб}}$  — перегрев двигателя при работе.

В качестве  $\tau_{\text{раб}}$  при проверке выбирается средний или максимальный за время (цикл) работы двигателя перегрев. При ориентировании на средний перегрев будет иметь место наиболее полное использование двигателя, хотя в некоторые периоды его работы перегрев будет превышать средний. Если же ориентироваться на максимальный перегрев, то рабочий перегрев двигателя всегда будет меньше нормативного, но при этом двигатель будет недоиспользован по своей мощности.

Проверка условия (9.12) может быть выполнена прямым или косвенными методами. Использование прямого метода предусматривает расчет и построение кривой перегрева  $\tau(t)$  за цикл работы двигателя. По этой кривой непосредственно определяются максимальный или средний перегревы, которые сопоставляются с допустимыми, и на основании этого судят о тепловом режиме двигателя. При использовании косвенных методов о нагреве двигателя судят по тем или иным косвенным показателям — потерям мощности, эквивалентным току, моменту или мощности.

Для использования прямого метода необходимо иметь математическое описание (математическую модель) теплового режима двигателя. Точное описание процессов нагрева и охлаждения двигателей является очень сложной задачей. Двигатель представляет собой совокупность деталей и узлов различной конфигурации, выполненных из различных материалов, что обуславливает и их различные теплоемкости и теплопередачу. Неодинаковыми являются условия нагрева отдельных частей двигателя, а направление тепловых потоков зависит от режима его работы.

В связи с трудностью проведения точного анализа при исследовании тепловых процессов в двигателях обычно принимаются следующие допущения: двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечно большую теплопроводность и одинаковую температуру во всех своих точках; теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды; окружающая среда обладает бесконечно большой теплоемкостью, т.е. в процессе нагрева двигателя ее температура не изменяется; теплоемкость двигателя и коэффициент его теплоотдачи не зависят от температуры. При этих условиях можно записать следующее исходное уравнение теплового баланса:

$$\Delta P dt = A \tau dt + C d\tau, \quad (9.13)$$

где  $\Delta P$  – потери мощности в двигателе, Вт;  $A$  – теплоотдача двигателя, Дж/(с·°C);  $C$  – теплоемкость двигателя, Дж/°C.

Решение уравнения (9.13) имеет вид

$$\tau = (\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{уст}}) e^{-t/T_T} + \tau_{\text{уст}}, \quad (9.14)$$

где  $\tau_{\text{уст}} = \Delta P / A$  – установившееся превышение температуры двигателя, °C;  $T_T = C / A$  – тепловая постоянная времени нагрева или охлаждения двигателя, с;  $\tau_{\text{нач}}$  – начальный перегрев двигателя, °C.

Выражение (9.14) может быть использовано для исследования теплового режима двигателя как при его нагреве, так и при охлаждении. Необходимо лишь подставлять соответствующие значения  $\tau_{\text{уст}}$ ,  $\tau_{\text{нач}}$  и соответствующую тепловую постоянную времени  $T_T$  – нагрева  $T_T$  или охлаждения  $T_0$ .

Процессы нагрева и охлаждения некоторых типов двигателей могут характеризоваться различными тепловыми постоянными времени. Связано это с тем, что тепловая постоянная времени, характеризующая процесс изменения температуры, обратно пропорциональна теплоотдаче двигателя. Поэтому если при охлаждении двигателя, вызванном его остановом, условия его теплоотдачи изменяются, то изменяется и постоянная времени.

Количественно ухудшение теплоотдачи характеризуется коэффициентом ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе

$$\beta_0 = A_0 / A, \quad (9.15)$$

где  $A_0$ ,  $A$  – теплоотдача соответственно при неподвижном двигателе и номинальной скорости его вращения.

Приведем примерные значения коэффициента  $\beta_0$  для двигателей:

с независимой вентиляцией .....	1
без принудительного охлаждения .....	0,95 ... 0,98
самовентилируемых .....	0,45 ... 0,55
защищенных самовентилируемых .....	0,25 ... 0,35

Постоянная времени охлаждения двигателя  $T_0$  с учетом (9.15) связана с постоянной времени нагрева  $T_T$  следующим соотношением:  $T_0 = T_T / \beta_0$ . Так как  $\beta_0 \leq 1$ , то  $T_0 \geq T_T$ , т.е. охлаждение неподвижного двигателя происходит медленнее, чем нагрев.

На рис. 9.2 приведены кривые нагрева двигателя для разных  $\tau_{\text{нач}}$  и  $\Delta P$ . При принятых допущениях нагрев двигателя происходит по

экспоненциальном законе и характеризуется постоянной времени  $T_H$ . Большим потерям мощности  $\Delta P_1$  в двигателе соответствует большее значение установившегося перегрева  $\tau_{уст1}$  (кривые 1 и 2), меньшие потери  $\Delta P_2$  определяют меньший перегрев  $\tau_{уст2}$ .

Время достижения установившегося значения перегрева при экспоненциальном законе его изменения теоретически бесконечно большое. Практически процесс нагрева можно считать установившимся, когда превышение температуры двигателя достигнет уровня  $(0,95 \dots 0,98) \tau_{уст}$  за время  $\tau_{уст} \approx (3 \dots 4) T_H$ .

Таким образом, время достижения перегревом своего установившегося значения зависит от постоянной времени нагрева двигателя. Так как теплоемкость двигателя пропорциональна его объему, а теплоотдача – площади поверхности, то двигатели большей мощности, имеющие большие габаритные размеры, имеют, как правило, и большую постоянную времени нагрева. Обычно постоянная времени нагрева лежит в пределах от нескольких минут до нескольких часов.

Охлаждение двигателей сопровождается снижением перегрева по кривой 1 (рис. 9.3) при уменьшении нагрузки и по кривым 2 и 3 при отключении двигателя от сети.

Порядок проверки электродвигателей по нагреву прямым методом состоит в следующем. По графику нагрузки двигателя определяются потери мощности на отдельных участках цикла работы и находятся значения установившегося перегрева на каждом из них по формуле  $\tau_{уст i} = \Delta P_i / A_r$ . Далее для участков работы (нагрева) и пауз (охлаждения) двигателя определяются постоянные времени нагрева и охлаждения. Затем по формуле (9.14) для каждого участка цикла строится кривая перегрева  $\tau(t)$ , при этом начальным значением  $\tau_{нач i}$  на каждом участке является конечное значение  $\tau_{кон (i-1)}$  на предыдущем участке.

По построенной таким образом кривой перегрева  $\tau(t)$  находится его максимальное или среднее значение и проверяется выполнение условия (9.12).

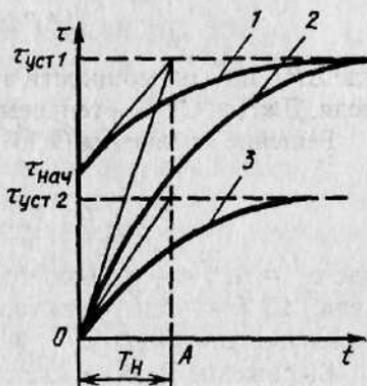


Рис. 9.2

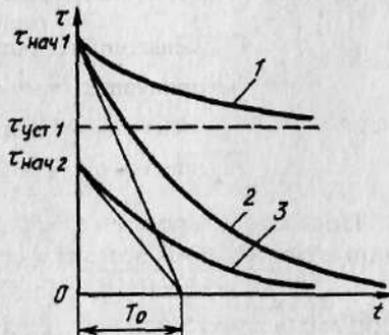


Рис. 9.3

### 9.3. ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЕЙ ПО НАГРЕВУ КОСВЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Прямой метод проверки двигателей по нагреву имеет один существенный недостаток – для его использования необходимо знать тепловые параметры – теплоотдачу  $A$  и теплоемкость  $C$ . Так как в каталогах и справочниках по двигателям эти параметры обычно не указываются, то практическое использование прямого метода проверки оказывается затруднительным. В связи с этим в большинстве случаев проверка двигателей по нагреву осуществляется косвенными методами, не требующими построения графика  $\tau(t)$ . К их числу относятся методы средних потерь и эквивалентных величин.

Метод средних потерь является наиболее точным и универсальным из косвенных методов. Сущность этого метода заключается в определении средних потерь мощности  $\Delta P_{\text{ср}}$  за цикл работы двигателя и сопоставлении их с номинальными потерями мощности  $\Delta P_{\text{ном}}$ , после чего делается заключение о нагреве двигателя.

При использовании метода средних потерь рассматривается достаточно удаленный цикл работы двигателя, в котором средний перегрев его не изменяется.

Режим работы двигателя, в котором количество выделившегося в нем тепла за цикл равняется отданному в окружающую среду, называют квазиустановившимся. В этом режиме средний перегрев двигателя за время цикла  $t_{\text{ц}}$  составляет

$$\tau_{\text{ср}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P dt / (A t_{\text{ц}}) = \Delta P_{\text{ср}} / A, \quad (9.16)$$

где  $\Delta P_{\text{ср}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P dt / t_{\text{ц}}$  – средние потери мощности за цикл.

Итак, в соответствии с (9.16) средние потери за цикл определяют средний перегрев двигателя  $\tau_{\text{ср}}$ . По аналогии номинальные потери мощности в двигателе определяют его допустимый (нормативный) нагрев  $\tau_{\text{доп}}$ , т. е.  $\tau_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{ном}} / A$ .

С учетом (9.16) допустимый нагрев двигателя будет при условии

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}}, \quad (9.17)$$

которое и является основным расчетным соотношением метода средних потерь.

В том случае, когда на отдельных участках цикла нагрузка постоянна, как, например, на рис. 9.4, средние потери определяются по формуле

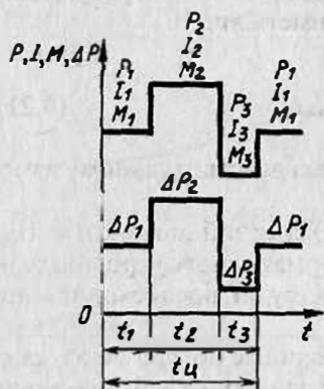


Рис. 9.4

$$\Delta P_{\text{ср}} = (\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3) / (t_1 + t_2 + t_3) = \sum_1^n \Delta P_i t_i / \sum_1^n t_i. \quad (9.18)$$

Номинальные потери мощности двигателя определяются по каталожным данным по формуле

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) / \eta_{\text{ном}}. \quad (9.19)$$

Метод средних потерь позволяет оценить тепловой режим работы двигателя по среднему превышению температуры. В этом заключается определенная погрешность метода, поскольку максимальный перегрев двигателя на отдельных участках цикла может превышать  $\tau_{\text{ср}}$ . Точность оценки нагрева этим методом тем выше, чем больше постоянная нагрева двигателя  $T_{\text{н}}$  превышает значение  $t_{\text{макс}}$  наиболее продолжительного участка цикла работы двигателя, т. е. в случае выполнения неравенства  $t_{\text{макс}} < T_{\text{н}}$ . При этом  $\tau_{\text{ср}} \approx \tau_{\text{макс}}$ .

**Методы эквивалентных величин** основываются на методе средних потерь.

*Метод эквивалентного тока* целесообразно использовать в том случае, когда известен график изменения тока двигателя во времени, который может быть получен расчетным путем или экспериментально.

Для получения расчетной формулы метода эквивалентного тока представим в соответствии с (8.1) средние потери мощности в двигателе как сумму постоянных  $K$  и переменных  $V$  потерь:

$$\Delta P_{\text{ср}} = 1 / t_{\text{ц}} \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i = 1 / t_{\text{ц}} \sum_{i=1}^n K t_i + 1 / t_{\text{ц}} \sum_{i=1}^n V_{\text{ном}} (I_i / I_{\text{ном}})^2 t_i, \quad (9.20)$$

где  $\Delta P_i$ ,  $I_i$ ,  $t_i$  — потери мощности, ток двигателя и продолжительность  $i$ -го участка рабочего цикла;  $n$  — число участков в цикле.

С учетом (9.20) условие проверки двигателя по нагреву (9.17) после некоторых преобразований будет иметь вид:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i^2 t_i) / t_{\text{ц}}} = I_{\text{экр}} \leq I_{\text{ном}}. \quad (9.21)$$

Ток  $I_{\text{экр}}$  эквивалентен по условиям нагрева действительному изменяющемуся во времени току двигателя.

Итак, в соответствии с формулой (9.21) средний нагрев двигателя не будет превосходить допустимого (нормативного) уровня, если эквивалентный ток за цикл его работы не будет превосходить номинального (паспортного) тока.

Формула (9.21) справедлива, если постоянные потери не изменяются за цикл работы, а сопротивления главных цепей двигателя остаются неизменными в цикле работы. Следовательно, если постоянные потери или сопротивление главных цепей двигателя из-

меняются, то метод эквивалентного тока даст погрешность в оценке теплового состояния двигателя.

*Метод эквивалентного момента* удобно использовать в том случае, когда известен график изменения момента двигателя во времени  $M(t)$ . В дополнение к указанным условиям применения метода эквивалентного тока при использовании метода эквивалентного момента должно соблюдаться еще одно условие – постоянство магнитного потока двигателя на протяжении всего цикла работы.

Если это условие выполняется, то умножив обе части выражения (9.21) на  $k\Phi_{\text{ном}}$ , получим следующую формулу:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i^2 t_i) / t_{\text{ц}}} = M_{\text{экв}} \leq M_{\text{ном}}, \quad (9.22)$$

где  $M_{\text{экв}}$  – эквивалентный по условиям нагрева среднеквадратичный момент двигателя за рабочий цикл.

*Метод эквивалентной мощности* используется, если известен график изменения мощности во времени, и при условии постоянства постоянных потерь, магнитного потока и скорости двигателя на всех участках рабочего цикла.

Допустим, что скорость двигателя на всех участках цикла равна номинальной. Умножив обе части соотношения (9.22) на  $\omega_{\text{ном}}$ , получим

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i^2 t_i) / t_{\text{ц}}} = M_{\text{экв}} \omega_{\text{ном}} = P_{\text{экв}} \leq P_{\text{ном}}, \quad (9.23)$$

где  $P_{\text{экв}}$  – эквивалентная по условиям нагрева мощность, определяемая как среднеквадратичная механическая мощность двигателя за рабочий цикл.

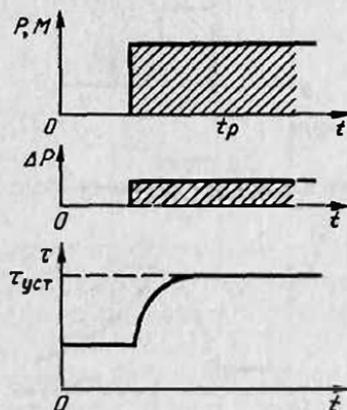


Рис. 9.5

Если выполняется соотношение (9.23), то при соблюдении указанных ранее условий нагрев двигателя не превысит допустимого уровня.

**Особенности проверки двигателей по нагреву косвенными методами при различных режимах их работы.** Работа двигателей по характеру изменения нагрузки на их валу, а тем самым по виду их нагрева и охлаждения подразделяется на восемь режимов с условными обозначениями от S1 до S8.

*Продолжительный номинальный режим работы (S1)* двигателя характери-

зуется неизменной нагрузкой в течение времени, за которое перегрев всех его частей достигает установившегося значения. Графики изменения мощности на валу  $P$ , момента  $M$ , потерь мощности  $\Delta P$  и перегрева  $\tau$  для этого режима приведены на рис. 9.5. Признаком режима  $S1$  является выполнение условия  $t_p > 3T_n$ , где  $t_p$  — время работы (включения) двигателя. Работа двигателя в режиме  $S1$  может происходить с постоянной или переменной циклической нагрузкой.

При работе двигателя с постоянной нагрузкой (см. рис. 9.5), так как двигатель выбирается по условию  $P \leq P_{ном}$ , выполняются и условия

$$\Delta P \leq \Delta P_{ном}; \quad \tau_{max} = \tau_{уст} \leq \tau_{доп}. \quad (9.24)$$

Таким образом, при постоянной продолжительной нагрузке не требуется дополнительных расчетов по определению нагрева двигателя.

При переменной циклической нагрузке двигателя (см. рис. 9.4) также будут изменяться его ток, момент и потери. Проверка двигателя по нагреву в этом случае выполняется методами средних потерь или эквивалентных величин.

*Кратковременный номинальный режим (S2)* характеризуется чередованием периодов неизменной нагрузки с периодами отключения двигателя; при этом за время его работы  $t_p$  превышение температуры не достигает установившегося уровня, а за время отключения (паузы)  $t_0$  все части двигателя охлаждаются до температуры окружающей среды. Стандартные значения продолжительности рабочего периода составляют 10, 30, 60 и 90 минут. Графики, характеризующие кратковременный режим работы двигателя, показаны на рис. 9.6. Режим  $S2$  соответствует условиям  $t_p < 3T_n$ ,  $t_0 > 3T_0$ .

Если двигатель рассчитан на продолжительный режим работы, то при кратковременном режиме превышение температуры к концу рабочего периода  $t_p$  не достигнет установившегося значения, т.е. в этом случае двигатель будет недоиспользован по нагреву, а значит и по своей мощности.

Для полного использования в кратковременном режиме работы двигателя, предназначенного для работы в продолжительном режиме, его следует перегружать по мощности на валу. В этом случае к концу рабочего периода его перегрев достигнет допустимого (нормативного) уровня.

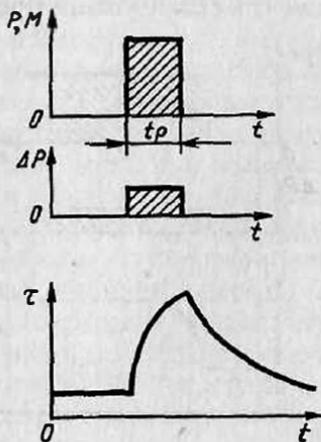


Рис. 9.6

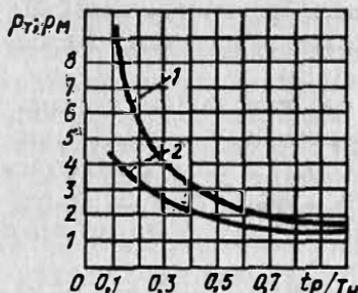


Рис. 9.7

Для количественной оценки перегрузки и нагрева двигателя используются коэффициенты термической и механической перегрузок.

Коэффициентом термической перегрузки  $p_T$  называется отношение потерь мощности при кратковременном режиме  $\Delta P_K$  к номинальным потерям мощности  $\Delta P_{ном}$ :

$$p_T = \Delta P_K / \Delta P_{ном} = 1 / (1 - e^{-t_p/T_n}). \quad (9.25)$$

Зависимость коэффициента термической перегрузки  $p_T$  при кратковременном режиме работы двигателя от относительной длительности его рабочего периода  $t_p / T_n$  показана на рис. 9.7 (кривая 1).

Коэффициентом механической перегрузки  $p_M$  называется отношение мощности нагрузки двигателя  $P_K$  в кратковременном режиме работы, к номинальной мощности  $P_{ном}$  в продолжительном режиме:  $p_M = P_K / P_{ном}$ .

Коэффициент механической перегрузки можно выразить с помощью коэффициента термической перегрузки:

$$p_T = (a + p_M) / (a + 1), \quad (9.26)$$

где  $a = K/V$  — коэффициент потерь.

Из (9.26) следует, что

$$p_M = \sqrt{(1+a)p_T + a}. \quad (9.27)$$

При  $t_p / T_n = 0,3 \dots 0,4$  допустимый по условиям нагрева коэффициент механической перегрузки  $p_M$  примерно равен 2,5 (см. рис. 9.7, кривая 2), что в среднем соответствует перегрузочной способности двигателей общепромышленных серий. Вследствие этого при меньших значениях  $t_p / T_n$  полное использование таких двигателей по нагреву ограничивается их перегрузочной способностью. Другими словами, при малых значениях отношения  $t_p / T_n$  двигатели недоиспользуются по нагреву и поэтому в этих случаях можно вообще не производить их проверку по нагреву, а следует ограничиться только проверкой по условиям перегрузки.

Промышленность выпускает специальные электродвигатели, рассчитанные для кратковременного режима работы, основная особенность которых заключается в повышенной перегрузочной способности, что позволяет полнее использовать их по нагреву. Время работы этих двигателей нормируется и составляет 10, 30, 60 и 90 мин. Это значит, что двигатель, имеющий, например, номинальную мощность  $P_{ном} = 10$  кВт при  $t_p = 30$  мин, может развивать в течение

ние 30 мин мощность 10 кВт не перегружаясь. Затем он должен быть отключен от сети до тех пор, пока полностью не охладится до температуры окружающей среды.

Необходимо отметить, что двигатели, предназначенные для кратковременного режима работы, нецелесообразно использовать в продолжительном режиме из-за присущих им повышенных постоянных потерь мощности. Иногда такие двигатели не могут работать в продолжительном режиме даже вхолостую, перегреваясь при этом выше допустимого уровня.

*Повторно-кратковременный номинальный режим работы (S3)* характеризуется чередованием периодов нагрузки  $t_p$  (рабочие периоды) с периодами отключения двигателя  $t_o$  (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений. Этому режиму соответствуют условия  $t_p < 3T_w$ ,  $t_o < 3T_o$  (рис. 9.8).

Относительная продолжительность включения (ПВ) двигателя в этом режиме (%):

$$ПВ = t_p / (t_p + t_o) 100\% = (t_p / t_{\Sigma}) 100\%. \quad (9.28)$$

К показанному на рис. 9.8 стандартному для режима S3 графику нагрузки можно свести более сложные зависимости путем расчета эквивалентных мощности, момента и тока на рабочих участках цикла.

Для повторно-кратковременного режима работы выпускаются специальные серии двигателей. В каталогах на них указывается номинальная мощность  $P_{ном}$  при нормативной продолжительности включения  $ПВ_{ном} = 15, 25, 40, 60$  и  $100\%$ . Длительность рабочего цикла  $t_{\Sigma}$  для них не должна превышать 10 мин, в противном случае двигатель считается работающим в продолжительном режиме.

Если при повторно-кратковременном режиме ПВ и мощность нагрузки равны (или близки) номинальным данным двигателя, то проверка его по нагреву не требуется, поскольку работа при таких параметрах нагрузочной диаграммы гарантируется заводом-изготовителем.

Рассмотрим проверку двигателя по нагреву в случае, когда относительная продолжительность его включения в реальном цикле  $ПВ_1$  заметно отличается от нормативной  $ПВ_{ном}$ . Допустим, что  $ПВ_1$  соответствует на-

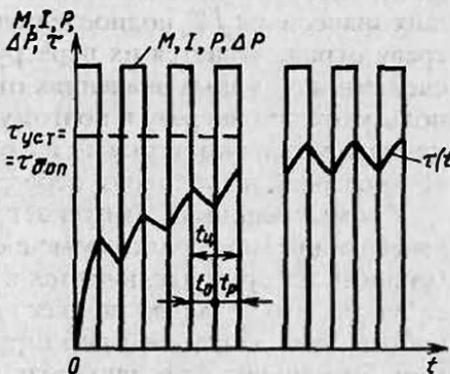


Рис. 9.8

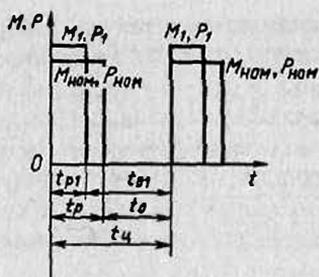


Рис. 9.9

грузке  $P_1$ , а стандартной  $P_{ном}$  соответствует номинальная мощность  $P_{ном}$ , как показано на графиках нагрузки на рис. 9.9. На основании метода средних потерь можно утверждать, что средняя температура двигателя не будет превышать допустимой температуры, если средние потери мощности за цикл при  $P_1$  и  $P_{ном}$  не будут превышать потери за тот же цикл при  $P_{ном}$  и  $P_{ном}$ , т. е. если

$$\Delta P_1 P_{в1} \leq \Delta P_{ном} P_{вном}. \quad (9.29)$$

Отсюда следует, что, для того чтобы при работе с мощностью  $P_1$  и  $P_{в1}$  средняя температура двигателя не превышала допустимую, между потерями мощности должно существовать соотношение

$$\Delta P_1 P_{в1} / P_{вном} \leq \Delta P_{ном}. \quad (9.30)$$

Порядок проверки двигателя по нагреву состоит в следующем. Сначала определяются потери в двигателе за время его работы  $\Delta P_1$  и реальная продолжительность включения  $P_{в1}$ . Затем по паспортным данным двигателя для ближайшей нормативной  $P_{вном}$  находят номинальные потери двигателя  $\Delta P_{ном}$  и проверяется выполнение условия (9.30). Если оно выполняется, нагрев двигателя не будет превосходить нормативного.

Проверка двигателя по нагреву может быть произведена также сопоставлением номинальных и эквивалентных тока, момента и мощности двигателя, определяемых по нагрузочным диаграммам. Заменяя в (9.30) потери мощности через постоянные  $K$  и переменные  $V_{ном}$  потери, после преобразований получим следующее соотношение:

$$I_{ном} \geq I_1 \sqrt{P_{в1} / [a(P_{вном} - P_{в1}) + P_{вном}]}. \quad (9.31)$$

При условии постоянства магнитного потока за цикл работы из (9.31) следует, что

$$M_{ном} \geq M_1 \sqrt{P_{в1} / [a(P_{вном} - P_{в1}) + P_{вном}]}, \quad (9.32)$$

а из (9.32) при условии неизменности скорости двигателя

$$P_{ном} \geq P_1 \sqrt{P_{в1} / [a(P_{вном} - P_{в1}) + P_{вном}]}. \quad (9.33)$$

Если условия (9.31) ... (9.33) выполняются, то температура двигателя не будет превосходить допустимого значения.

В случаях, когда реальная продолжительность включения ненормативного отличается от нормативной, в (9.31) ... (9.33) произведением  $a(P_{вном} - P_{в1})$  можно пренебречь.

Проверку по нагреву двигателей, предназначенных для продолжительного режима работы, но используемых для повторно-кратковременной нагрузки, можно выполнять с помощью формул (9.31)...(9.33), если считать в них  $P_{\text{ном}} = 100\%$ . Для двигателей продолжительного режима работы, у которых теплоотдача в период пауз ухудшается, целесообразно учитывать этот фактор при оценке нагрева. Расчетные формулы для этого случая рассмотрены в [4, 12, 14, 19].

Рассмотренные режимы  $S1, S2, S3$  являются основными и наиболее характерными для электродвигателей. Кроме того, классификация предусматривает еще пять режимов  $S4...S8$ , которые являются разновидностями первых трех и встречаются реже. Проверка двигателей по нагреву в этих режимах производится методами средних потерь или эквивалентных величин.

**Задача 9.2\***. ДПТ типа 2ПФ 200 имеет следующие паспортные данные:  $P_{\text{ном}} = 30$  кВт;  $n_{\text{ном}} = 2200$  об/мин;  $I_{\text{ном}} = 74$  А;  $U_{\text{ном}} = 440$  В;  $\eta_{\text{ном}} = 90\%$ .

Оценить тепловой режим двигателя при его работе по следующему циклу: время первого участка  $t_1 = 12$  мин, момент нагрузки  $M_{c1} = 120$  Н·м; время второго участка  $t_2 = 25$  мин, момент нагрузки  $M_{c2} = 145$  Н·м; время третьего участка  $t_3 = 18$  мин, момент нагрузки  $M_{c3} = 100$  Н·м. Ток возбуждения и сопротивление якорной цепи не изменяются. Заданный цикл относится к продолжительному режиму работы с переменной нагрузкой.

Так как ток возбуждения и сопротивление цепи якоря не изменяются, то для проверки двигателя по нагреву можно воспользоваться методом эквивалентного момента.

Определим номинальные угловую скорость и момент двигателя:

$$\omega_{\text{ном}} = \pi n_{\text{ном}} / 30 = 3,14 \cdot 2200 / 30 = 230 \text{ рад / с};$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 30000 / 230 = 130,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Рассчитаем по (9.23) эквивалентный среднеквадратичный момент нагрузки двигателя:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\sum_1^3 (M_{ci}^2 t_i) / t_{\Sigma}} = \sqrt{(120^2 \cdot 12 + 145^2 \cdot 25 + 100^2 \cdot 18) / (12 + 25 + 18)} = 126,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Сопоставим рассчитанный эквивалентный момент  $M_{\text{экв}}$  с номинальным. Так как  $M_{\text{экв}} = 126,4 < M_{\text{ном}} = 130,3$  Н·м, то двигатель не будет перегреваться выше допустимого уровня.

**Задача 9.3\***. АД краново-металлургической серии типа МТКВ 511-8 имеет номинальные мощность  $P_{\text{ном}} = 28$  кВт при  $P_{\text{ном}} = 25\%$  и скорость  $n_{\text{ном}} = 700$  об/мин. Оценить нагрев двигателя, если он будет периодически включаться на 3 мин и преодолевать при этом момент нагрузки  $M_c = 350$  Н·м, после чего будет отключаться на 5 мин. Данный цикл работы относится к повторно-кратковременному режиму.

Определим номинальную угловую скорость и номинальный момент при  $PB_{\text{ном}}$  двигателя:

$$\omega_{\text{ном}} = \pi n_{\text{ном}} / 30 = 3,14 \cdot 700 / 30 = 73,3 \text{ рад/с};$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 28\,000 / 73,3 = 382 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Найдем продолжительность включения двигателя в цикле:

$$PB_1 = t_p / (t_p + t_o) 100\% = 3 / (3 + 5) 100\% = 37,5\%.$$

Вычислим момент нагрузки при стандартной  $PB_{\text{ном}} = 25\%$ :

$$M_{\text{экв}} = M_c \sqrt{PB_1 / PB_{\text{ном}}} = 350 \sqrt{37,5 / 25} = 429 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Сопоставим приведенные к одной стандартной ( $PB_{\text{ном}} = 25\%$ )  $M_{\text{экв}}$  и  $M_{\text{ном}}$ . Так как  $M_{\text{экв}} = 429 \text{ Н}\cdot\text{м} > M_{\text{ном}} = 382 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , двигатель при работе в таком цикле будет перегреваться сверх допустимого уровня.

**Задача 9.4.** Для условий задачи 9.2 выполнить проверку двигателя по нагреву методами средних потерь и эквивалентного тока.

**Задача 9.5.** Для условий задачи 9.3 при тех же паузе и моменте нагрузки определить время работы двигателя, при котором перегрев двигателя не будет превосходить допустимого уровня.

## 9.4. ВЫБОР И ПРОВЕРКА ПО НАГРЕВУ РЕЗИСТОРОВ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Включение резисторов в цепи электродвигателей производится с целью регулирования их скорости, а также для ограничения тока и момента при пуске, реверсе и торможении. Расчет сопротивлений резисторов, обеспечивающих требуемые искусственные характеристики двигателей, рассмотрен в разд. 4.4 и 5.3.

Резистор выбирается по двум основным параметрам – сопротивлению и току, причем его сопротивление должно равняться расчетному, а номинальный ток соответствовать току двигателя при работе. Это обеспечит нормативный нагрев резистора. Подбор сопротивления осуществляется за счет последовательного, параллельного и смешанного соединения отдельных элементов в секции.

Проверка резистора по нагреву производится методом эквивалентного тока в зависимости от режима его работы. Если расчетный эквивалентный ток не превышает номинального тока резистора, то его температура находится в допустимых пределах и он может работать в таком режиме сколь угодно долго.

Для продолжительного режима работы проверка резистора по нагреву состоит в сопоставлении по формуле (9.22) его эквивалентного рабочего тока с номинальным значением. Выполнение условия (9.22) свидетельствует о нормальном тепловом режиме резистора.

Кратковременный и повторно-кратковременный режимы работы резисторов характеризуются, как и для двигателя, графиками нагрузки, приведенными на рис. 9.6 и 9.8. Для этих режимов расчет эквивалентных токов производится с помощью расчетных коэффициентов, зависящих от времени работы резистора и его постоянной времени нагрева. Эти зависимости приведены на рис. 9.10, а, б, где  $K_k$ ,  $K_{пк}$  – соответственно расчетные коэффициенты для кратковременного и повторно-кратковременного режимов;  $T_H$  – постоянная времени нагрева.

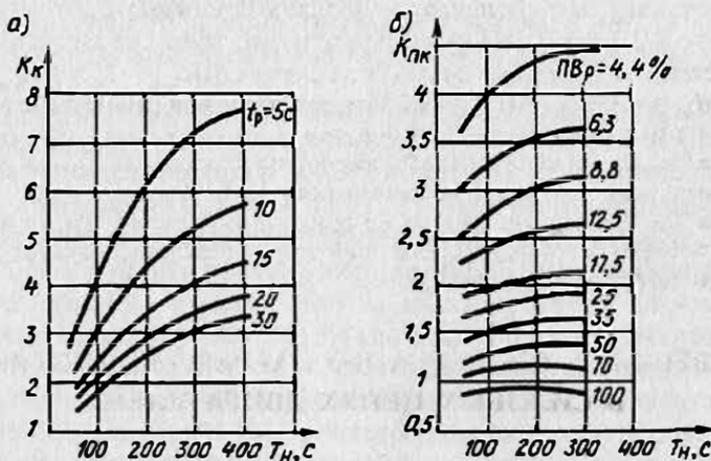


Рис. 9.10

Порядок проверки предварительно выбранного резистора по нагреву состоит в следующем. С помощью графика работы двигателя определяют эквивалентный (рабочий) ток  $I_{эв}$ , протекающий по резистору, время его протекания  $t_p$  для кратковременного режима и продолжительность включения  $ПВ_p$  для повторно-кратковременного режима. Далее для найденных  $t_p$  или  $ПВ_p$  по постоянной времени нагрева резистора  $T_H$  (значения которой вместе со значениями номинального продолжительного тока резистора приводятся в справочной литературе [3]) с помощью кривых рис. 9.10 находят коэффициенты  $K_k$  или  $K_{пк}$ . Далее определяют расчетный ток резистора:

$$I_{расч} = I_{эв} / K_k \quad \text{или} \quad I_{расч} = I_{эв} / K_{пк} \quad (9.34)$$

и производят его сопоставление с номинальным током резистора  $I_{\text{ном}}$ . При  $I_{\text{расч}} \leq I_{\text{ном}}$  нагрев резистора не будет превосходить допустимого (нормативного).

Применяемые в ЭП резисторы выполняются с использованием нихромовой, фехральной, константановой проволоки или ленты, намотанной на изолятор, или из чугунных элементов. Отдельные элементы объединяются в ящики резисторов.

Ящики резисторов с проволочными фехральевыми элементами имеют обозначение НФ11А, а с константановыми – НК1А. Проволочные элементы выпускаются 19 типоразмеров на сопротивления от 0,7 до 96 Ом и длительные токи соответственно от 19 до 1,7 А. Допустимый перегрев в продолжительном режиме для фехральных элементов составляет  $350^{\circ}\text{C}$ , а для константановых  $250^{\circ}\text{C}$ .

Ящики с ленточными резисторами имеют обозначение НФ1А. Они выпускаются с элементами 11 исполнений с сопротивлениями секций от 0,078 до 1,38 Ом на длительные токи соответственно от 107 до 24 А.

Ящики резисторов с чугунными элементами применяются в ЭП всех мощностей вплоть до нескольких тысяч киловатт. Ящики типа ЯС100 состоят из 20 элементов НС400 с сопротивлением каждого от 0,005 до 0,11 Ом на токи от 215 до 46 А соответственно. Ящики типа ЯС101 состоят из 40 элементов типа НС401 с сопротивлением каждого от 0,038 до 0,28 Ом на токи соответственно от 55 до 20 А. Близкими по своим данным к стандартным ящикам ЯС100 и ЯС101 являются ящики резисторов крановой серии Н, которые являются взаимозаменяемыми.

В настоящее время электротехническая промышленность выпускает вместо ящиков резисторов типа НФ-1А, НФ-11А и НК-11А блоки с константановыми и фехральевыми ленточными элементами БФ6, с константановыми и фехральевыми проволочными элементами БК12 и блоки универсальные в комбинированном исполнении.

Серия БФ6 содержит шесть блоков с общим сопротивлением от 0,078 до 1,38 Ом. Серия БК12 включает в себя 12 блоков с общим сопротивлением от 0,7 до 96 Ом (константановые элементы) и от 2,6 до 94 Ом (фехральные элементы).

**Задача 9.6\*.** Двигатель работает в кратковременном режиме со временем включения  $t_p = 25$  с. Оценить нагрев постоянно включенного в его цепь резистора типа НС413/0,4 ( $I_{\text{ном}} = 30$  А,  $T_{\text{н}} = 132$  с), если по нему протекает ток  $I_{\text{эв}} = 56$  А.

Для заданных условий по кривым рис. 9.10, а найдем  $K_x = 2,3$ . Определим расчетный ток резистора

$$I_{\text{расч}} = I_{\text{эв}} / K_x = 56 / 2,3 = 24,3 \text{ А.}$$

Так как  $I_{\text{расч}} = 24,3 \text{ А} < I_{\text{ном}} = 30 \text{ А}$ , то резистор не будет перегреваться выше допустимого уровня.

**Задача 9.7.** Двигатель пускается через равные промежутки времени с частотой 300 включений в час. Пусковой резистор обтекается током  $I_{\text{зв}} = 245 \text{ А}$  в течение 1,5 с. Определить, может ли быть применен в этом случае ящик резисторов типа ЯСЧ0,5, элементы которого рассчитаны на номинальный продолжительный ток 91 А и постоянную времени нагрева 270 с?

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается задача выбора двигателя?
2. На основании каких исходных данных производится расчет мощности двигателя?
3. Что такое нагрузочная диаграмма двигателя?
4. В чем сущность проверки двигателя по перегрузке и условиям пуска?
5. В чем сущность проверки двигателя по нагреву?
6. На чем основывается прямой метод проверки двигателя по нагреву?
7. Что такое метод средних потерь?
8. В чем сущность методов эквивалентных величин?
9. В каких основных режимах может работать двигатель и чем они характеризуются?
10. Каким образом производится проверка по нагреву силовых резисторов в цепях двигателей?

## Глава 10. РАЗОМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

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.

## 10.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ РУЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ

К аппаратам ручного управления относятся командные мало-мощные 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, числу замыкающих и размыкающих контактов, форме толкателя. Две, три или более кнопок, смонтированных в одном корпусе, образуют кнопочную станцию. Одноцепные кнопки управления выпускают с замыкающим и размыкающим контактами (рис. 10.1, а). Отметим, что контакты на схемах изображаются в «нормальном» состоянии электрических аппаратов, т.е. когда на них не оказывается механического, электрического, магнитного или какого-либо другого воздействия. Двухцепные кнопки имеют обе пары показанных контактов с единым приводом. Особенностью кнопок управления является их способность возвращаться в исходное (нормальное) положение (самовозврат) после снятия воздействия. Выпускаются кнопки серий КУ 120 и КЕ, предназначенные для работы в цепях переменного тока с напряжением до 500 В и постоянного тока с напряжением до 220 В и токами до 4 А.

**Ключи управления (универсальные переключатели)** предназначены для подачи управляющего воздействия на ЭП и имеют два или более фиксированных положений рукоятки и несколько замыкающих и размыкающих контактов (см. рис. 10.1, б). В среднем положении рукоятки (позиция 0) замкнут контакт  $SM1$ , что обозначается точкой на схеме, а контакты  $SM2$  и  $SM3$  разомкнуты. В положении 1 рукоятки замыкается контакт  $SM2$  и размыкается  $SM1$ . Число контактов ключей и диаграмма их работы могут быть самыми различными.

Ключи управления серии ПЕ рассчитаны на те же напряжения и токи, что и кнопки управления КЕ. Универсальные переключатели серий УП 5300, УП 5400 и ПКУ 3 используются для коммутации цепей катушек контакторов, масляных выключателей, управления многоскоростными АД и в ряде других случаев. Они могут коммутировать до 32 цепей и иметь до восьми положений (позиций) рукоятки управления.

**Командоконтроллеры (командоаппараты)** служат для коммутации

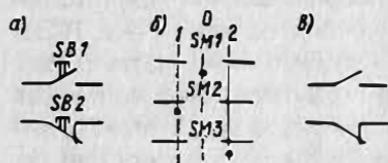


Рис. 10.1

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 (см. рис. 10.1).

Командоаппараты общепромышленного назначения серий 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. Командо-контроллеры 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 11 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, а следовательно, и производительность рабочей машины или механизма, и улучшить условия труда оператора, так как управление ЭП с помощью командоконтроллера или кнопочной станции не потребует 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).

## **10.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ**

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. Другими словами, это двухпозиционные коммутационные аппараты с самовозвратом, включение и выключение которых осуществляется электрическим сигналом.

**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), номинальному току и напряжению коммутируемых цепей, конструктивному исполнению и другим признакам.

Устройство однополюсного контактора постоянного тока показано на рис. 10.2, 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 1, что обеспечивает коммутацию тока  $I$ . Необходимое нажатие главных контактов в их рабочем положении обеспечивается пружиной 6. В процессе соприкосновения контактов 1 и 5 происходит их перекатывание и притирание, что уменьшает переходное сопротивление контакта.

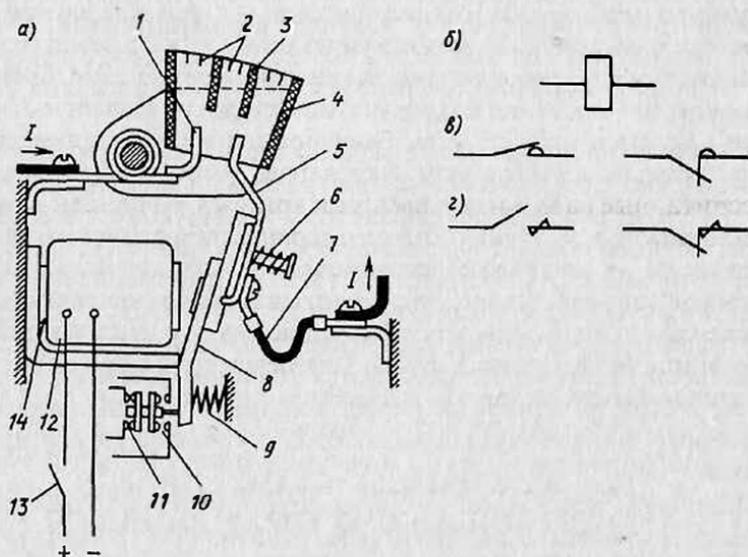


Рис. 10.2

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. 10.2, б, в, г показаны соответственно условные обозначения элементов контактора: втягивающей катушки; замыкающих и размыкающих главных контактов без дугогашения и с дугогашением. Условное обозначение вспомогательных контактов см. на рис. 10.1, в.

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. Контакторы этих серий имеют магнитную систему клапанного типа, главные контакты пальцевого типа и вспомогательные контакты мостикового типа. Контакторы 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 невтянутом 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 магнито-

провода, 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.

Контакты переменного тока на электрических схемах обозначаются так же, как и контакты постоянного тока.

Контакты 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 частотой 50 Гц. Модификацией этих серий являются контакты 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 контактов 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 контакты серии МК. Такие контакты обеспечивают коммутацию тока до 63 А в цепях постоянного тока напряжением до 440 В и в цепях переменного тока напряжением до 660 В частотой 50 и 60 Гц, 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 воздействия 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  $(10 \dots 16) \cdot 10^6$  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. 10.3). 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 отпущения, а отношение тока (напряжения) возврата к току (напряжению) срабатывания – коэффициентом возврата реле.

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

Поскольку контакты реле коммутируют небольшие (5...10 А) токи, они обычно имеют простую конструкцию без использования дугогасительных камер.

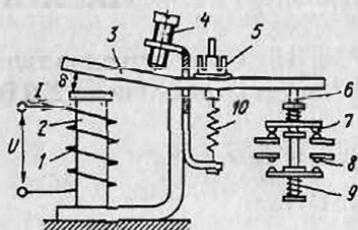


Рис. 10.3

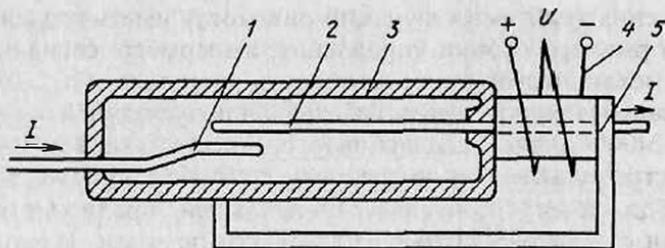


Рис. 10.4

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. 10.4). 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.

### 10.3. ДАТЧИКИ ВРЕМЕНИ, СКОРОСТИ, ТОКА И ПОЛОЖЕНИЯ

Для управления электроприводом, в том числе и разомкнутым, необходима информация о текущих значениях скорости, тока, мо-

мента 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. 10.5) 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 катушке якорь 6 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 6, 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. 10.5, б).

Выдержка времени может регулироваться ступенчато за счет латунной немагнитной прокладки 7 определенной толщины, устанавливаемой на якорь 6 (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).

Выдержку времени электромагнитным реле можно обеспе-

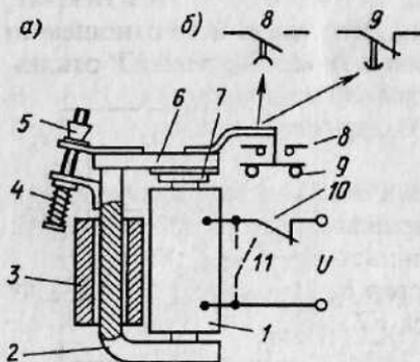


Рис. 10.5

чить 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 (электромеханическое) 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* (рис. 10.6) обычно используются различные полупроводниковые элементы (чаще всего транзисторные) и конденсаторы, время разряда или заряда которых и определяет выдержку времени.

В исходном положении реле внешний управляющий контакт  $K$  замкнут и на базу транзистора  $VT1$  подается отрицательный потенциал источника питания  $GB$ . Данный транзистор при этом открыт, а потенциал базы транзистора  $VT2$  положительный по отношению к его эмиттеру и он закрыт. В результате выходное реле  $KV$  отключено. В исходном положении конденсатор  $C$  заряжен с показанной на рисунке полярностью обкладок.

Команда на начало отсчета времени подается при размыкании внешнего управляющего контакта  $K$ . После этого начинается разряд конденсатора  $C$  через резистор  $R_2$  и переход эмиттер – база транзистора  $VT1$ . В результате разряда конденсатора транзистор  $VT1$  закроется, на базе транзистора  $VT2$  появится отрицательный потенциал и

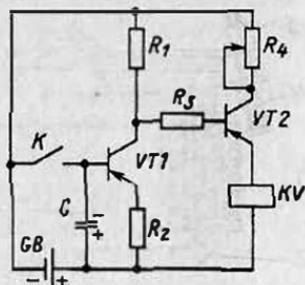


Рис. 10.6

он откроется, при этом по обмотке реле  $KV$  начнет протекать ток, оно сработает и переключит свои контакты. Отсчет времени закончится.

Выдержка времени такого реле определяется временем разряда конденсатора  $C$ , которое зависит от его емкости и сопротивления резистора  $R_2$ . Регулируя эти величины, можно установить требуемую выдержку времени реле. 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 (установкой) 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. 10.7, а) представляет собой постоянный магнит  $I$ , соединенный с валом дви-

гателя, 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.

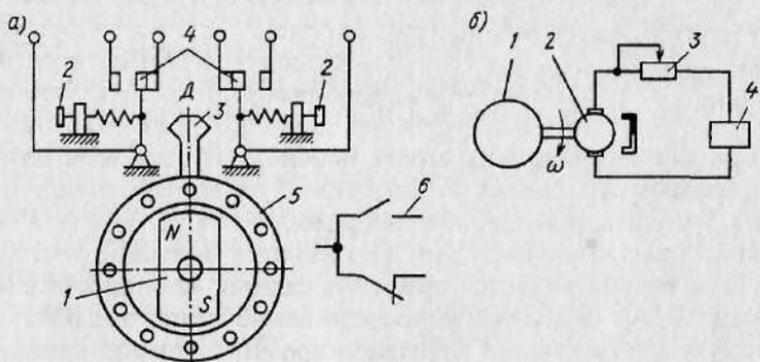


Рис. 10.7

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. 10.7, 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-30П; ТД 103-ПМ и ТД 201-ПМ; МЭТ 8155 и с обмоткой возбуждения серий ТГ, СЛ, ТД, а также асинхронные и синхронные тахогенераторы. Применение тахогенераторов в замкнутых схемах см. в гл. 11.

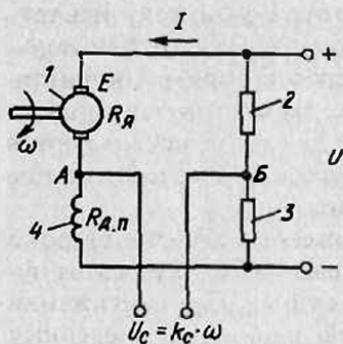


Рис. 10.8

В качестве источника информации о скорости может использоваться якорь двигателя постоянного тока при включении его в схему тахометрического моста (рис. 10.8), которая образуется резисторами 2 и 3 с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , обмотками якоря 1 с сопротивлением  $R_я$  и дополнительных полюсов 4 с сопротивлением  $R_{д.п.}$ . Если подобрать сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  так, чтобы соблюдалось условие  $R_1 R_я = R_2 R_{д.п.}$ , то мост окажется сбалансированным и напряжение на его диагонали (между точками

$A$  и  $B$ ) не будет зависеть от тока якоря, а будет пропорционально скорости двигателя:

$$U_c = R_1 k \Phi_{ном} \omega / (R_1 + R_2). \quad (10.1)$$

Схема тахометрического моста используется как в замкнутых, так и разомкнутых схемах управления. В последнем случае к точкам  $A$  и  $B$  подсоединяется катушка реле.

В некоторых случаях, когда не требуется большая точность, а предпочтительной является простота, сигнал, пропорциональный скорости, может сниматься непосредственно со щеток ДПТ.

Ротор АД также может служить источником информации о его скорости. ЭДС, наводимая в роторе АД, определяется соотношением  $E_2 = E_{2к} s$ , где  $E_{2к}$  – ЭДС при неподвижном роторе;  $s$  – скольжение АД, связанное со скоростью соотношением (5.4). Таким образом, напряжение на кольцах АД, определяемое ЭДС ротора и падением напряжения в его обмотках, содержит информацию о скорости этого двигателя.

*Центробежное реле скорости*, выполненное по принципу центробежного регулятора скорости, вследствие своей громоздкости и невысокой надежности в схемах ЭП применяется редко.

**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 (см. рис. 10.8). 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.

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.

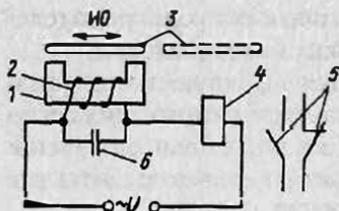


Рис. 10.9

Бесконтактный индукционный датчик положения (рис. 10.9) состоит из разомкнутого магнитопровода 1 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 1

(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 1, индуктивное сопротивление катушки 2 возрастет и в цепи (за счет подбора емкости конденсатора 6) наступит резонанс тока и резкое его снижение. Реле 4 в результате снижения тока отключается, что вызывает переключение его контактов 5 в цепи управления ЭП.

Потенциметрические, сельсинные и цифровые датчики положения применяются главным образом в замкнутых ЭП и рассматриваются в гл. 11.

#### 10.4. ВИДЫ И АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ, БЛОКИРОВОК И СИГНАЛИЗАЦИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Для обеспечения надежной работы ЭП и технологического оборудования в схемах управления предусматривается специальная защитная аппаратура. Этой же цели служат и различные блокировочные связи, обеспечивающие заданный порядок операций по управлению одним или несколькими ЭП и технологическим оборудованием, а также предотвращающие ошибочные действия оператора. Кроме того, во многих случаях целесообразно осуществлять контроль за состоянием и режимами работы отдельных узлов ЭП, что обеспечивается с помощью средств сигнализации, измерительных и регистрирующих приборов.

**Аппараты максимальной токовой защиты.** При работе ЭП может произойти замыкание электрических цепей между собой или на землю (корпус), а также увеличение тока в силовых цепях сверх допустимого предела, вызванное стопорением движения исполнительного органа рабочей машины, обрывом одной из фаз питающего АД или СД напряжения, резким снижением тока возбуждения ДПТ. Для защиты ЭП и питающей сети от появляющихся в этих случаях недопустимо больших токов (сверхтоков) предусматривается максимальная токовая защита, которая может реализовывать-

ся различными средствами – с помощью плавких предохранителей, реле максимального тока и автоматических выключателей.

Плавкие предохранители *FU* включаются в каждую линию (фазу) питающей двигатель сети между выключателем напряжения сети *Q* и контактами линейного контактора *KM*, а также в цепи управления. На рис. 10.10, *а, б, в* показаны соответственно схемы защиты предохранителями АД, ДПТ и цепей управления.

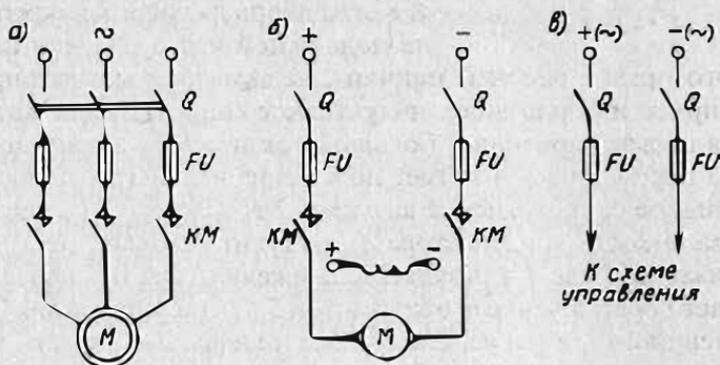


Рис. 10.10

Основными элементами предохранителя являются плавкая вставка и дугогасительное устройство. Выбор плавкой вставки предохранителей производится по току, который рассчитывается таким образом, чтобы она не перегорала от пускового тока двигателя.

Для защиты электрических цепей ЭП при напряжении до 1000 В применяются следующие типы предохранителей: трубчатые без наполнителя серии ПР2; быстродействующие серии ПНБ-5; с высокой разрывной способностью серии ПП 31; трубчатые разборные с закрытыми патронами и наполнителем серии ПН 2; резьбовые серии ПРС. Плавкие вставки этих предохранителей калибруются на токи от 6 до 1000 А.

Реле максимального тока используются в основном в ЭП средней и большой мощности. Катушки этих реле *FA1* и *FA2* включаются в две фазы трехфазных двигателей переменного тока и в один или два полюса ДПТ между выключателем *Q* и контактами линейного контактора *KM* (рис. 10.11, *а, б*). Размыкающие контакты этих реле включаются также в цепь катушки линейного контактора *KM* (см. рис. 10.11, *в*). При возникновении сверхтоков в контролируемых цепях, превышающих токи срабатывания (уставки) реле *FA1* и *FA2*, контакты этих реле размыкаются и силовые контакты линейного контактора *KM* отключают двигатель от питающей сети.

Уставки реле максимального тока должны выбираться таким образом, чтобы не происходило отключения двигателей при их пус-

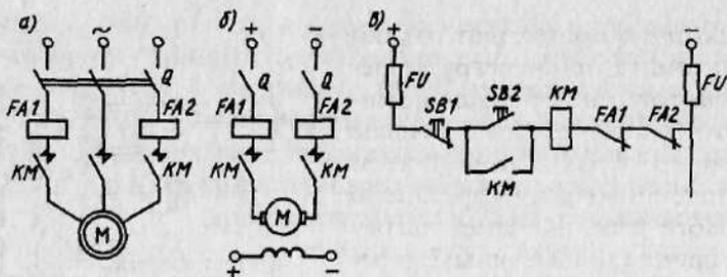


Рис. 10.11

ке или других переходных процессах, т.е. когда токи в силовых цепях в несколько раз превышают номинальный уровень.

В качестве реле максимального тока в ЭП применяются реле мгновенного действия серии РЭВ 570 для цепей постоянного тока от 0,6 до 1200 А и серии РЭВ 571Т для цепей переменного тока от 0,6 до 630 А. Эти реле допускают регулировку своей уставки соответственно в пределах  $(0,7...3) I_{\text{ном}}$  и  $(0,7...2) I_{\text{ном}}$  с точностью до  $\pm 10\%$ . Время их срабатывания порядка 0,05 с. В схемах управления применяются также реле серий РЭ 70, РЭВ 830, РЭВ 302 и др.

**Автоматические воздушные выключатели (автоматы).** Эти комплексные многоцелевые аппараты обеспечивают ручное включение и отключение двигателей, их защиту от сверхтоков, перегрузок и снижения питающего напряжения. Кроме того, некоторые автоматы обеспечивают дистанционное отключение двигателей. Для обеспечения выполнения этих функций автомат имеет контактную систему, замыкание и размыкание которой осуществляется вручную с помощью рукоятки или кнопки, максимальное токовое реле и тепловое токовое реле.

Важной частью автомата является механизм свободного расцепления, который обеспечивает его отключение при поступлении управляющих или защитных воздействий, например при протекании токов перегрузки, коротком замыкании, снижении напряжения сети, а также при необходимости дистанционного отключения автомата.

Упрощенное устройство автомата показано на рис. 10.12, а. Рабочий ток нагрузки  $I$  протекает через контакт 1 автомата и нагреватель теплового реле б в катушку 9 реле максимального тока. При коротком замыкании в контролируемой цепи сердечник 10 реле максимального тока втягивается в катушку 9 и через толкатель 8 воздействует на рычаг 5 механизма свободного расцепления. Последний поворачивается по часовой стрелке и приподнимает защелку 4. При этом освобождается рычаг 3 и, воздействуя на пружину 2, размыкает контакты 1 автомата.

Аналогично происходит отключение автомата при перегрузке цепи, когда ток в ней больше номинального (расчетного), но меньше тока короткого замыкания. В этом случае ток, проходя по нагревателю 6 теплового реле, вызывает нагрев биметаллической пластины 7, в результате чего свободный конец этой пластины поднимается вверх и через рычаг 5 открывает защелку 4, вызывая этим отключение контактов автомата.

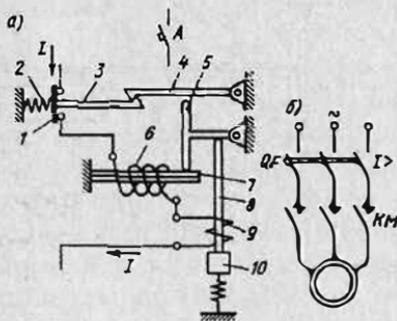


Рис. 10.12

Часто в автоматах применяют тепловые расцепители без нагревателя, в этом случае контролируемый ток пропускается непосредственно через биметаллическую пластину. В маломощных автоматах такой расцепитель может выполнять также функции элемента максимальной токовой защиты.

Схема включения автомата *QF* с целью обеспечения подключения и защиты трехфазного АД приведена на рис. 10.12, б. Автоматические выключатели широко используются для коммутации и защиты силовых и маломощных цепей ЭП всех видов.

Применяемые в ЭП автоматические выключатели серий АП 50, АК 63, А 3000, А 3700, АЕ 2000, ВА, ВАБ, «Электрон» различаются между собой числом контактов (полюсов), уровнями номинальных тока и напряжения, набором и исполнением реализуемых защит, отключающей способностью, быстродействием. Диапазон их номинальных токов составляет 10... 10 000 А, а предельных коммутационных токов 0,3... 100 кА. Время включения различных автоматов находится в пределах от 0,02 до 0,7 с.

**Нулевая защита.** При значительном снижении напряжения сети или его исчезновении эта защита обеспечивает отключение двигателей и предотвращает самопроизвольное их включение (самозапуск) после восстановления напряжения.

В тех случаях, когда двигатели управляются кнопками контакторов или магнитных пускателей, нулевая защита осуществляется самими этими аппаратами без применения дополнительных средств. Например, если в схемах рис. 10.11 исчезло или сильно понизилось напряжение сети, катушка линейного контактора *KM* потеряет питание и он отключит двигатель от сети. При восстановлении напряжения включение двигателя возможно только после нажатия на кнопку управления *SB2*.

При управлении ЭП от командоконтроллера или ключа с фиксированным положением их рукояток нулевая защита (рис. 10.13)

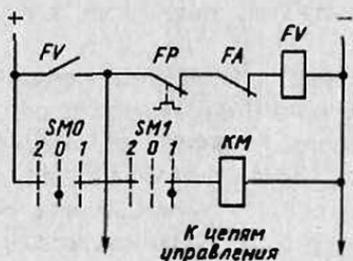


Рис. 10.13

осуществляется с помощью дополнительного реле напряжения  $FV$ . В этой схеме реле  $FV$  включается при нулевом положении командоконтроллера (ключа) через контакт  $SM0$ , после чего оно начинает получать питание через свой собственный контакт. При переводе рукоятки командоконтроллера (ключа) в положение пуска  $I$  питание всей схемы управления будет осуществляться че-

рез этот контакт, поэтому при исчезновении напряжения реле  $FV$  отключится, прекратит питание схемы и линейный контактор  $KM$  отключит двигатель от сети. При восстановлении напряжения питания повторное включение двигателя возможно лишь после установки рукоятки вновь в нулевое (среднее) положение, чем исключается возможность его самозапуска.

Отметим также, что в рассмотренной схеме реле  $FV$  является исполнительным элементом еще двух защит – от токов короткого замыкания (через контакты реле максимального тока  $FA$ ) и тепловой (через контакты теплового реле  $FP$ ), что часто практикуется в схемах управления.

**Тепловая защита** отключает двигатель от источника питания, если вследствие протекания по его цепям повышенных токов происходит значительный нагрев его обмоток. Такая перегрузка возникает, например, при обрыве одной из фаз трехфазного АД или СД.

Тепловая защита двигателей осуществляется с помощью тепловых, максимальных токовых реле и автоматических выключателей.

Тепловые реле  $FP$  включаются в две фазы трехфазных двигателей непосредственно (рис. 10.14, а) или через трансформаторы тока  $TA$  (см. рис. 10.14, б), если ток двигателя превышает номинальный ток реле. Для защиты ДПТ тепловые реле включаются в один или два полюса цепи их питания (см. рис. 10.14, в). Размыкающие контакты тепловых реле включаются в цепи катушек главных (линейных) контакторов или в цепь защитного реле (см. рис. 10.13).

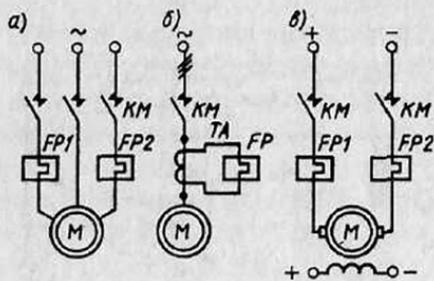


Рис. 10.14

Действие теплового реле основано на эффекте изгибания биметаллической пластинки при нагревании из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения образующих ее металлов (см. рис. 10.12, а).

Номинальный ток теплового элемента реле должен быть рав-

ным или несколько большим номинального тока двигателя, т. е.

$$I_{т.э} = (1 \dots 1,15) I_{ном}$$

В ЭП применяются электротепловые двухполюсные реле серий ТРН на номинальные токи от 0,32 до 40 А, однополюсные реле серий ТРТП на токи от 1,75 до 550 А и трехполюсные реле серий РТЛ на токи от 0,17 до 200 А. Эти реле имеют регулируемую уставку тепловой защиты; при токе  $1,2I_{ном}$  время их срабатывания 20 мин.

Тепловая защита двигателей может осуществляться также автоматическими выключателями и магнитными пускателями, если они имеют встроенные тепловые расцепители (см. рис. 10.12, а).

При повторно-кратковременных режимах работы ЭП, когда процессы нагрева реле и двигателя различны, защита двигателей от перегрузок осуществляется с помощью максимальных токовых реле *FA1* и *FA2* (см. рис. 10.11). Токи уставок этих реле выбираются на 20...30% выше номинального тока двигателя. Так как ток уставки реле в этом случае ниже пускового тока, то при пуске двигателя его контакты шунтируются контактами реле времени, имеющего выдержку времени несколько большую времени пуска двигателя.

**Минимальная токовая защита** применяется в ЭП с ДПТ и СД для защиты их цепей возбуждения от обрыва. Исчезновение тока возбуждения опасно тем, что, вызывая исчезновение противоЭДС двигателя, приводит к значительному возрастанию тока в его силовой цепи и резкому снижению развиваемого момента.

Эта защита осуществляется с помощью минимального токового реле *KF*, катушка которого включается в цепь обмотки возбуждения двигателя, как это показано на рис. 10.15. При этом замыкающий контакт реле *KF* помещается в цепь катушки контактора *KM*, что позволяет включать двигатель только при наличии тока возбуждения в его обмотке возбуждения *ОВМ*. При работе ЭП в случае исчезновения или резкого снижения тока возбуждения контакт реле *KF* разомкнется и контактор *KM*, потеряв питание, отключит двигатель от сети.

В качестве реле минимального тока в ЭП используется реле серии РЭВ 830.

**Специальные виды защит.** К ним относятся защита от перенапряжения на обмотке возбуждения ДПТ; защита от повышения напряжения в системе «преобразователь – двигатель»; защита от превышения скорости ЭП; защита от затянувшегося пуска СД и ряд других.

**Защита от перенапряжения на обмотке возбуждения ДПТ** требуется при отключении ее от источника питания.

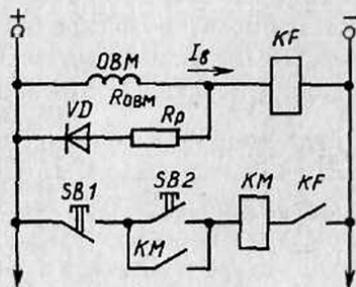


Рис. 10.15

В этом случае вследствие быстрого падения тока возбуждения, а значит, магнитного потока в обмотке возникает значительная (до нескольких киловольт) ЭДС самоиндукции, которая может вызвать пробой ее изоляции.

Защита осуществляется с помощью так называемого разрядного резистора  $R_p$ , включаемого параллельно обмотке возбуждения  $ОВМ$  (см. рис. 10.15) с сопротивлением  $R_{ОВМ}$ . Сопротивление резистора должно быть  $(4 \dots 5) R_{ОВМ}$  при напряжении питания 220 В и  $(6 \dots 8) R_{ОВМ}$  при напряжении 110 В. Для устранения потерь энергии в разрядном резисторе последовательно включается диод  $VD$ , который не пропускает через него ток при включенной обмотке возбуждения, но позволяет протекать току под действием ЭДС самоиндукции, возникающей при ее отключении. Выбор сопротивления  $R_p$  в указанных пределах позволяет снизить темп падения тока в обмотке возбуждения и тем самым ограничить ЭДС самоиндукции до допустимых пределов.

*Защита от повышения напряжения* применяется главным образом в системе «преобразователь – двигатель». Она реализуется с помощью реле напряжения, включаемого на выходе преобразователя и своими контактами воздействующего на цепи отключения напряжения ЭП. Эта защита косвенно защищает ДПТ и от чрезмерного увеличения скорости при появлении повышенного напряжения.

*Защита от превышения скорости* применяется в ЭП рабочих машин, для которых недопустимо превышение скорости движения исполнительных органов (лифты, подъемные лебедки, эскалаторы, шахтные подъемники). Такая защита обеспечивается с помощью тахогенератора или центробежных выключателей, соединенных с валом двигателя. Центробежные выключатели непосредственно воздействуют на цепь управления, а тахогенератор через реле напряжения, включаемое на его якорь.

*Защита от затянувшегося пуска СД* обеспечивает его прекращение, если к концу расчетного времени ток возбуждения СД не достигает заданного уровня. Осуществляется эта защита с помощью реле минимального тока  $KV$ , включаемого аналогично реле  $KF$  в цепь обмотки возбуждения СД (см. рис. 10.15), и реле времени  $KT$  (рис. 10.16). Если за время выдержки реле  $KT$ , равное времени нормального пуска СД, ток возбуждения оказывается недостаточным, то после замыкания контактов реле  $KT$  срабатывает реле защиты  $KVF$  и дает команду на прекращение пуска.

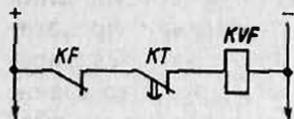


Рис. 10.16

*Путевая защита* обеспечивает отключение ЭП при достижении исполнительным органом рабочей машины крайних положений. Она осуществляется с помощью конеч-

ных выключателей, устанавливаемых в этих положениях исполнительного органа и размыкающих в случае необходимости цепи реле защиты или непосредственно линейных контакторов.

*Защита от выпадения СД из синхронизма* применяется для ЭП с синхронными двигателями, работающих с резко изменяющейся нагрузкой на валу и питающихся от сети, в которой возможно снижение напряжения. Такая защита осуществляется с помощью реле напряжения  $KV$  (рис. 10.17), включаемого на напряжение сети, и реле (контактора) форсировки возбуждения  $KF$ , замыкающий контакт которого включается параллельно добавочному резистору  $R_d$  в цепи обмотки возбуждения  $ОВВ$  возбудителя  $B$ .

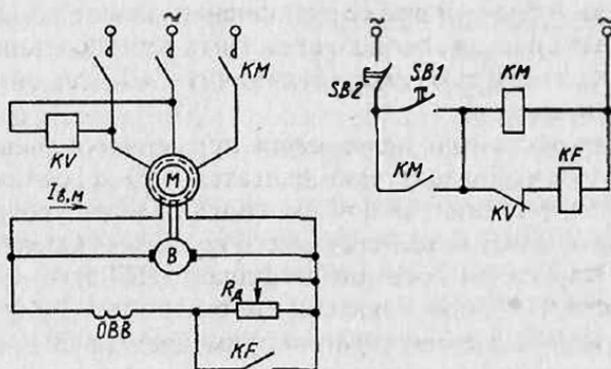


Рис. 10.17

При нормальном уровне напряжения в сети реле  $KV$  включено, а реле  $KF$  выключено, т.е. резистор  $R_d$  введен в цепь  $ОВВ$ , по которой протекает номинальный (или близкий к нему) ток. При снижении напряжения сети на 15...20% реле  $KV$  отключается и замыкает свой контакт в цепи катушки реле  $KF$ , которое, включаясь, своим контактом шунтирует резистор  $R_d$ . Ток возбуждения возбудителя, его напряжение и ток возбуждения СД  $I_{в.н}$  при этом возрастают, а значит, увеличивается и ЭДС двигателя. В соответствии с (6.1) это приводит к увеличению максимального момента и перегрузочной способности СД и тем самым обеспечивает его синхронную работу с сетью при увеличении нагрузки на валу.

*Электрические блокировки в схемах ЭП* служат для обеспечения заданной последовательности операций при управлении, предотвращения нештатных и аварийных ситуаций, а также для предотвращения последствий неправильных действий оператора, что значительно повышает надежность работы ЭП и технологического оборудования. Так, например, перекрестное включение размыкающих

контактов контакторов  $KM1$  и  $KM2$  (рис. 10.18, *a*) в цепи катушек не допускает включения одного из них при включенном другом. Такая блокировка применяется в реверсивных ЭП, где недопустимо одновременное включение двух контакторов, или в ЭП с электрическим торможением двигателя, где торможение может начаться только после отключения двигателя от сети.

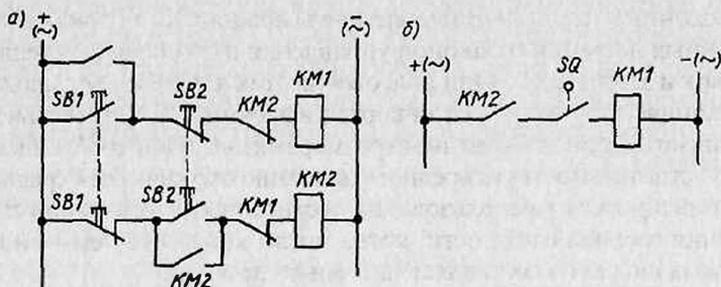


Рис. 10.18

Одновременное включение двух контакторов можно предотвратить также, используя двухцепные кнопки управления, имеющие замыкающий и размыкающий контакты. Как видно из рис. 10.18, *a*, нажатие любой из кнопок приводит к замыканию цепи катушки одного из контакторов и одновременному размыканию цепи другого контактора.

На рис. 10.18, *б* приведена схема некоторой технологической блокировки двух ЭП, работающих совместно в комплексе. Она допускает включение контактора  $KM1$  одного ЭП только после включения контактора  $KM2$  другого ЭП и при нажатом путевом выключателе  $SQ$ .

Некоторые другие виды блокировки будут рассматриваться далее в конкретных схемах управления.

**Сигнализация в схемах управления ЭП.** При контроле хода технологического процесса, последовательности выполнения операций, состояния защиты ЭП, наличия напряжения питания или какого-либо электрического сигнала, в случае отклонения от нормы применяется сигнализация, которая может быть световой (сигнальные лампы, табло), звуковой (звонок, сирена) и визуальной (указательные реле, измерительные приборы).

На рис. 10.19 показана возможная сигнализация в схеме управления ЭП. Здесь лампа  $HL1$  сигнализирует о подаче напряжения на схему (включение

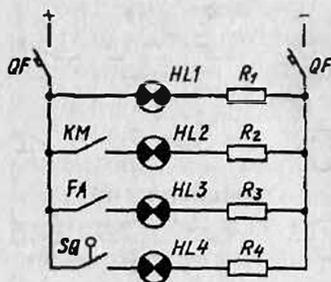


Рис. 10.19

автомата  $QF$ ), лампа  $HL2$  – о включении контактора  $KM$ , лампа  $HL3$  – о срабатывании реле максимальной токовой защиты  $FA$ , лампа  $HL4$  – о срабатывании конечного выключателя  $SQ$ .

## 10.5. БЕСКОНТАКТНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Бесконтактные логические элементы используются при реализации различных логических законов управления и для осуществления блокировок и защит в ЭП. Они долговечны, так как не имеют движущихся механических частей, отличаются высоким быстродействием, небольшими массой, габаритными размерами, энергопотреблением и малой чувствительностью к вредному влиянию окружающей среды. Наибольший эффект их использования достигается при создании схем управления средней сложности, когда число контролируемых и преобразуемых сигналов составляет несколько десятков.

Логический элемент выполняет те же функциональные операции, что и электромагнитное контактное реле. Он имеет два устойчивых состояния – «включено» и «выключено», которые обозначаются соответственно цифрами 1 и 0.

Для электромагнитного реле цифра 1 обозначает, что его контакт замкнут, а цифра 0 – разомкнут. Для бесконтактного логического элемента цифра 1 указывает на наличие напряжения на его выходе, а цифра 0 – на отсутствие. Аналогично обозначаются и входные сигналы элементов. Обозначим входные сигналы логических элементов, условные схемы которых приведены на рис. 10.20, буквой  $X$ , а выходные –  $Y$  и рассмотрим простейшие логические операции и элементы.

**Логический элемент НЕ** (см. рис. 10.20, а) выполняет операцию отрицания (инвертирования). При наличии входного сигнала, т. е. при  $X = 1$ , выходной сигнал отсутствует ( $Y = 0$ ), а при отсутствии входного сигнала ( $X = 0$ ) выходной сигнал  $Y = 1$ .

**Логический элемент ИЛИ**. Сигнал на выходе этого элемента появляется при наличии хотя бы одного входного сигнала  $X_1$  или  $X_2$  (см. рис. 10.20, б). Операция ИЛИ может выполняться для любого числа входных сигналов.

**Логический элемент И**. Сигнал на выходе этого элемента  $Y = 1$  (см. рис. 10.20, в) появляется только в том случае, когда оба входных сигнала равны 1. В остальных случаях  $Y = 0$ .

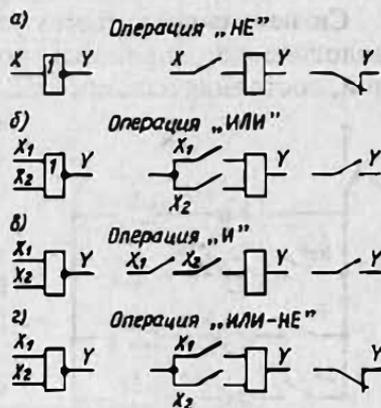


Рис. 10.20

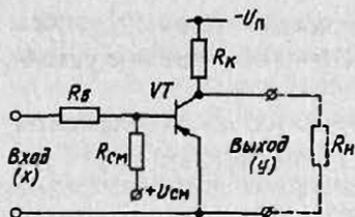


Рис. 10.21

Логический элемент ИЛИ – НЕ (см. рис. 10.20, з). В этом более сложном элементе при наличии хотя бы одного сигнала на входе ( $X_1, X_2 = 1$ ) сигнал на выходе  $Y = 0$ , а при отсутствии входных сигналов ( $X_1, X_2 = 0$ ) выходной сигнал  $Y = 1$ .

Кроме рассмотренных примеров логические элементы могут выполнять запоминание уровня входного сигнала (операция ПАМЯТЬ), блокировку (операция ЗАПРЕТ), выдержку времени на включение и отключение электрических аппаратов и другие операции. Логические элементы могут иметь различное исполнение.

*Транзисторные логические элементы в обычном и интегральном исполнении.* Основой этих элементов служит простейший однокаскадный усилитель (модуль), собранный по схеме с общим эмиттером (рис. 10.21). Схема работает следующим образом. В исходном положении, когда входной сигнал отсутствует ( $X = 0$ ), транзистор VT заперт положительным напряжением смещения  $+U_{СМ}$  (состояние отсечки транзистора) и на выходе усилителя (нагрузке  $R_Н$ ) напряжение равно напряжению питания  $-U_П$  ( $Y = 1$ ). При поступлении на вход усилителя входного сигнала отрицательной полярности транзистор открывается (переходит в режим насыщения) и напряжение на его выходе становится близким к нулю ( $Y = 0$ ). Такой транзисторный усилитель выполняет логическую операцию НЕ.

Логические элементы выпускаются в составе серии «Логика И», основой которой являются интегральные микросхемы серий К 155 и К 511.

Базовым элементом серии «Логика И» является функциональный элемент И – НЕ, схема которого показана на рис. 10.22. Его основой служит многоэмиттерный транзистор VT1 и три транзистора VT2, VT3, VT4 типа n-p-n. Если на все входы схемы – эмиттеры транзистора VT1 – поданы положительные входные сигналы  $U_{вхi} = 1$ , то он будет открыт и на его выходе будет напряжение  $U_{вых1} = 1$ . Если с одного из входов транзистора VT1 будет снят сигнал ( $U_{вхi} = 0$ ) или на него будет подан низкий положительный потенциал, то транзистор закроется и напряжение на его выходе будет  $U_{вых1} = 0$ . Таким образом, входной каскад на транзисторе VT1

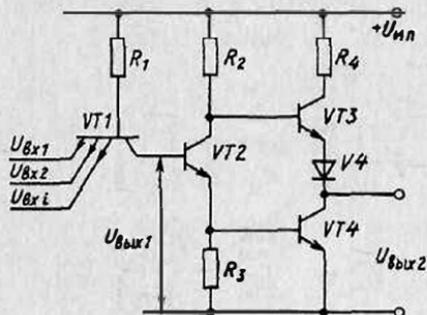


Рис. 10.22

осуществляет операцию И, а усилитель на транзисторах  $VT2... VT4$  – инвертирование сигнала  $U_{\text{вых1}}$  (операцию НЕ) и обеспечение устойчивой работы первого каскада.

В состав серии «Логика И», кроме логических, входят элементы согласования, времени и усилители.

Элементы согласования служат для связи логических элементов с другими аппаратами схем управления ЭП – кнопками, выключателями, реле, датчиками и т.д. Их основой является миниатюрное герконовое реле серии РПГ-6 с малым энергопотреблением и достаточно высоким быстродействием, которое обеспечивает и гальваническую развязку цепей управления.

Элементы времени обеспечивают выдержку времени от 0,01 до 10 с.

Усилители предназначены для управления по сигналам логических элементов исполнительными механизмами с потребляемой мощностью до нескольких десятков Вт. Они выполняются на мощных транзисторах и имеют дискретный выход.

Расширение возможностей применения логических элементов осуществляется разработкой наборов универсальных логических модулей матричного типа и использованием программируемых контроллеров (см. гл. 11).

В большинстве схем управления на логических элементах используется типовый узел «Память». Этот узел образуется соединением двух элементов ИЛИ – НЕ (рис. 10.23, а) и работает следующим об-

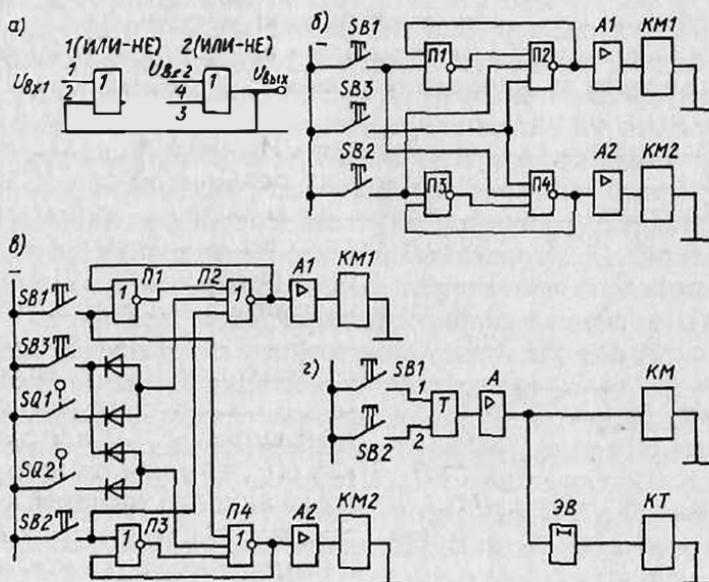


Рис. 10.23

разом. Допустим, что требуется запомнить информацию, характеризующуюся верхним уровнем дискретного сигнала  $U_{\text{вх}1} = 1$ , и иметь возможность «стереть» из памяти эту информацию. Запоминаемый сигнал  $U_{\text{вх}1} = 1$  подается на вход 1 первого элемента ИЛИ – НЕ. Так как элементы этого узла осуществляют функцию НЕ, то сигнала на выходе первого элемента не будет, а на выходе второго появится напряжение  $U_{\text{вых}}$ . Этот сигнал по цепи обратной связи поступит на вход 2 первого элемента. Теперь сигнал включения  $U_{\text{вх}1} = 1$  можно снять с входа 1, а сигнал на выходе узла  $U_{\text{вых}}$  будет существовать сколь угодно долго.

Для «стирания» из памяти записанной информации надо подать сигнал  $U_{\text{вх}2} = 1$  на вход 4 второго элемента схемы, который снимет сигнал  $U_{\text{вых}}$  с его выхода, и память будет «очищена».

Рассмотрим типовой узел реверсивной схемы (см. рис. 10.23, б) управления двигателем, реализованный на логических элементах. В нем использованы два узла «Память» (элементы П1... П4, ИЛИ – НЕ) и два согласующих усилителя А1 и А2, от которых питаются катушки контакторов КМ1 и КМ2, обеспечивающие включение двигателя в условных направлениях его скорости «Вперед» и «Назад».

Включение двигателя осуществляется кнопками «Вперед» SB1 и «Назад» SB2, воздействие на которые запоминается соответствующими узлами памяти. При этом кнопки SB1 и SB2 взаимно заблокированы, а нажатие кнопки SB3 («Стоп») приводит к отключению любого из включенных в данный момент контакторов КМ1 и КМ2.

Система управления двухдвигательным ЭП (см. рис. 10.23, в) на логических элементах выполняет следующие функции: включение двигателей М1 (контактор КМ1) и М2 (контактор КМ2) с помощью кнопок SB1 и SB2; отключение двигателей М1 при срабатывании конечного выключателя SQ1 и М2 при срабатывании выключателя SQ2; отключение двигателей кнопкой SB3 («Стоп»); блокировку, запрещающую одновременную работу двух двигателей М1 и М2.

Схема рис. 10.23, в во многом повторяет схему рис. 10.23, б. Для размножения сигналов запрета в ней применяются диодные элементы ИЛИ, входящие в состав серии логических элементов.

На рис. 10.23, г приведен типовой узел, с помощью которого может быть реализовано управление по принципу времени. В этой схеме узел «Память» представлен одним элементом, а логический элемент задержки времени обозначен ЭВ. Узел работает следующим образом. При нажатии кнопки SB1 («Пуск») через усилитель А подается питание на катушку контактора КМ, который включает двигатель. Одновременно с этим сигнал поступает на вход элемента задержки ЭВ, который, отсчитав свою выдержку времени, включает реле КТ. Это реле, в свою очередь, производит требуемые переключения в схеме управления, в частности вызывает шунтирование пускового резистора.

## 10.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ И ТОРМОЗНЫЕ УСТРОЙСТВА

В состав электроприводов ряда рабочих машин входят электромагнитные муфты и тормозные устройства.

**Электромагнитная муфта** – это силовое электромеханическое устройство, позволяющее регулировать скорость исполнительного органа рабочей машины при постоянной скорости вращения двигателя. В некоторых случаях электромагнитные муфты (ЭММ) используются и для регулирования прикладываемаемого к исполнительному органу момента.

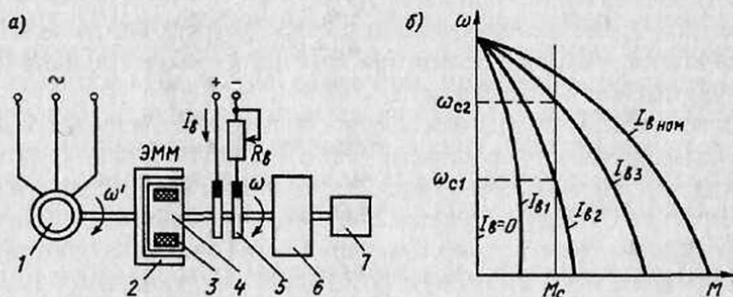


Рис. 10.24

Электромагнитная муфта (рис. 10.24, а) состоит из двух механически не связанных друг с другом частей – ведущей и ведомой. Ведущая часть, называемая якорем 2 и выполняемая из ферромагнитного материала, соединяется с валом двигателя 1 (на рисунке показан асинхронный двигатель). Ведомая часть, называемая индуктором 4, располагается внутри ведущей части и соединяется через редуктор б (или непосредственно) с исполнительным органом 7 рабочей машины. На индукторе 4 располагается обмотка возбуждения 3, которая через контактные кольца 5 подключается к источнику питания. Ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  может регулироваться, например с помощью резистора  $R_{\text{в}}$ , за счет чего и происходит изменение скорости ведомой части муфты, а следовательно, и исполнительного органа 7. Рассмотрим процесс регулирования скорости подробнее, считая, что якорь 2 приводится во вращение от двигателя 1 с постоянной скоростью  $\omega'$ .

Если обмотка индуктора 4 не обтекается током возбуждения, то между ним и якорем 2 отсутствует магнитная связь и индуктор 4 неподвижен ( $\omega = 0$ ).

При протекании по обмотке 3 тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  в воздушном зазоре между якорем и индуктором возникает магнитное поле, под

действием которого во вращающемся якоре 2 будут циркулировать вихревые токи. Взаимодействие этих токов с магнитным полем создает вращающий момент, под действием которого индуктор начинает вращаться в ту же сторону со скоростью  $\omega$ . Принцип действия электромагнитной муфты во многом похож на принцип действия асинхронного двигателя, имеющего массивный (сплошной) ротор.

Из механических характеристик муфты  $\omega(M)$ , представляющих собой зависимости скорости индуктора (ведомой части)  $\omega$  от развиваемого им момента  $M$  при разных токах возбуждения  $I_n$  (см. рис. 10.24, б), видно, что, например, при постоянном моменте нагрузки  $M_c$  регулирование тока возбуждения от  $I_{n2}$  до  $I_{n3}$  позволяет изменить скорость индуктора от  $\omega_{c1}$  до  $\omega_{c2}$ .

Для получения жестких механических характеристик используются замкнутые схемы управления током возбуждения, например с обратной связью по скорости.

Рассмотренная муфта относится к группе электромагнитных муфт со связью между ее частями через магнитное поле. Существуют также муфты с механической связью. В них передача вращающего момента от ведущей части к ведомой осуществляется посредством механического трения или зацепления за счет создания между ними магнитного поля электромагнита с нормальным давлением. Существенно реже в ЭП применяются гидравлические муфты (гидропередачи).

Применение электромагнитных муфт позволяет в ряде случаев упростить автоматизацию технологических процессов и регулирование скорости движения исполнительных органов рабочих машин.

**Тормозные устройства.** ЭП ряда рабочих машин и механизмов снабжаются тормозными устройствами, которые обеспечивают остановку их исполнительных органов в заданных положениях, ограничение пути торможения после отключения двигателя, а также удержание (фиксацию) исполнительных органов в определенном положении после отключения двигателя. К таким рабочим машинам относятся в первую очередь подъемно-транспортные механизмы – краны, лифты, подъемники, эскалаторы и др.

Существующие тормозные устройства имеют весьма разнообразное исполнение. Они подразделяются: по виду привода – на электромагнитные, гидравлические и пневматические; по конструкции фрикционных элементов – на дисковые, конические и цилиндрические (которые бывают колодочными и ленточными); по начальному положению фрикционных элементов – на нормально разомкнутые и нормально замкнутые.

В большинстве ЭП применяются тормоза с приводом от электромагнитов, называемые электромагнитными. Эти тормоза могут быть постоянного и переменного тока; в зависимости от длины хода

якоря электромагнита – длинноходовые и короткоходовые; с продолжительностью включения 15, 25, 40 и 60% от времени цикла работы ЭП. Короткоходовой тормоз имеет ход якоря электромагнита, близкий или равный перемещению фрикционных элементов (колодок), а ход якоря электромагнита длинноходового тормоза в несколько раз превышает это перемещение.

Принцип действия нормально замкнутого колодочного тормоза с приводом от электромагнита состоит в следующем. В исходном (нормальном) положении, когда электромагнит не подключен к источнику питания, его колодки с помощью пружины прижимаются к тормозному шкиву, расположенному на валу двигателя, и затормаживают его. При включении двигателя напряжение одновременно подается и на обмотку электромагнита. Якорь электромагнита, притягиваясь к сердечнику, растормаживает колодки тормоза и двигатель начинает вращаться. При отключении двигателя теряет питание и электромагнит, и пружина вновь прижимает колодки к шкиву, обеспечивая торможение ЭП. Для обеспечения такой работы электромагнита его обмотка обычно подключается непосредственно на якорь ДПТ или статор АД.

В ЭП постоянного тока применяются тормоза серии ТКП с короткоходовыми электромагнитами. Они выпускаются на тормозные моменты до 500 Н·м и имеют расчетный ход от 1,2 до 4,5 мм. Тормоза серий ТКП 400... ТКП 800 рассчитаны на тормозные моменты до 12 500 Н·м при ходе до 5 мм. Износостойкость этих тормозов составляет  $5 \cdot 10^6$  циклов.

В длинноходовых тормозах постоянного тока применяются электромагниты типа КМП и ВМ с тормозными моментами до 50 Н·м и максимальным ходом колодок до 4,5 мм (при ходе якоря до 120 мм). Износостойкость длинноходовых электромагнитов составляет примерно  $1 \cdot 10^6$  циклов.

Время включения тормозов постоянного тока составляет 0,15... 2,5 с, а выключения 0,1... 0,6 с. При использовании форсировки время их включения сокращается до 0,1... 1 с.

Для ЭП переменного тока выпускаются тормоза серии ТКТ с короткоходовыми однофазными электромагнитами типов МО 100 и МО 200. Они рассчитаны на тормозные моменты от 11 до 240 Н·м и имеют износостойкость до  $1,5 \cdot 10^6$  циклов. Собственное время включения электромагнитов около 0,03 с, а время отключения 0,02 с.

Длинноходовые тормоза переменного тока серии КМТ рассчитаны на тормозные моменты от 450 до 4000 Н·м и имеют ход электромагнита в пределах 50... 800 мм. Время их включения 0,1... 0,5 с, а отключения 0,15... 0,6 с. Износостойкость этих тормозов составляет  $(0,4... 1) \cdot 10^6$  циклов.

В ЭП некоторых производственных механизмов, в первую очередь крановых, в тормозах переменного тока применяются так называемые электрогидравлические толкатели (ЭГТ), которые имеют более высокую износостойкость, обеспечивают плавную работу тормоза, характеризуются меньшим потреблением тока и большей надежностью в работе.

ЭГТ представляет собой комплексное устройство, включающее в себя электродвигатель переменного тока небольшой (до 0,4 кВт) мощности, центробежный насос и гидроцилиндр с поршнем. Внутренняя полость ЭГТ заполняется маслом.

Работает ЭГТ следующим образом. При подаче на двигатель напряжения он начинает вращать крыльчатку насоса. Последний создает давление под поршнем, который начинает перемещаться вместе со штоком вверх и растормаживать колодки тормоза. В самом верхнем положении открываются каналы в цилиндре, масло перетекает в нижнюю часть ЭГТ и движение прекращается. Время подъема и опускания штока ЭГТ обычно составляет 0,3...1,5 с.

Выпускаемые тормоза с ЭГТ серий ТКТГ рассчитаны на тормозные моменты от 100 до 12 500 Н·м при ходе колодок 1,2...1,8 мм. Срок службы тормозов с ЭГТ составляет 10 лет при числе циклов до  $4 \cdot 10^6$ .

Кроме тормозов, представляющих собой отдельные устройства, в ЭП находят широкое применение встраиваемые в двигатель тормоза, составляющие с ним единый конструктивный модуль. Такие тормоза выполняются, как правило, дисковыми и управляются от электромагнитов постоянного и переменного тока.

В отечественной практике применяются также многодисковые тормоза с электромагнитами переменного тока типа ТМТ и постоянного тока типа ТДП. Момент торможения обеспечивается в них центральной пружиной, которая прижимает друг к другу подвижные и неподвижные диски. Растормаживание происходит, как и в обычных тормозах, при подаче напряжения на двигатель и обмотку электромагнита, состоящую из нескольких секций, располагающихся по окружности на общем тороидальном магнитопроводе.

Электродвигатели со встраиваемыми электромагнитными тормозами выпускаются в составе серий 4А, краново-металлургических двигателей и ряде других.

## **10.7. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

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

тока или пути. Рассмотрим ряд типовых схем, с помощью которых реализуются указанные режимы.

**Типовая схема пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в функции времени.** Эта схема (рис. 10.25, 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 происходит возбуждение ДПТ и срабатывает реле  $KT$ , размыкая свой контакт в цепи катушки контактора  $KM2$  и подготавливая двигатель к пуску.

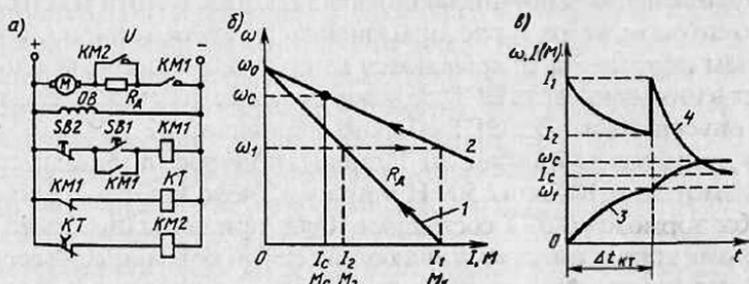


Рис. 10.25

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  $\Delta t_{KT}$ , называемый выдержкой времени, размыкающий контакт  $KT$  замкнется в цепи катушки контактора  $KM2$ , последний включится и главным контактом закоротит пусковой резистор  $R_d$  в цепи якоря. Таким образом, при пуске двигатель в течение времени  $\Delta t_{KT}$  разгоняется по искусственной характеристике 1 (см. рис. 10.25, 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  $\Delta t_{KT}$  после начала пуска скорость вращения двигателя (кривая 3) достигает значения  $\omega_1$ , а ток в цепи якоря (кривая 4) снижается до уровня  $I_2$  (см. рис. 10.25, в). После шунтирования резис-

тора  $R_d$  ток в цепи якоря скачком возрастает до значения  $I_1$ , не превышающего допустимого уровня. Изменение скорости, тока и момента во времени происходит по экспоненте [см. формулы (2.30) и (2.32)].

Время изменения скорости двигателя от нуля до уровня  $\omega_1$ , определяющее настройку реле времени  $KT$ , можно рассчитать по (2.33).

**Типовая схема пуска двигателя постоянного тока в две ступени в функции ЭДС и динамического торможения в функции времени.** В этой схеме (рис. 10.26, а) в качестве датчика ЭДС используется якорь двигателя  $M$ , к которому подключены катушки контакторов ускорения  $KM1$  и  $KM2$ . С помощью регулировочных резисторов  $R_{y2}$  и  $R_{y1}$  эти контакторы настраиваются на срабатывание при определенных скоростях двигателя.

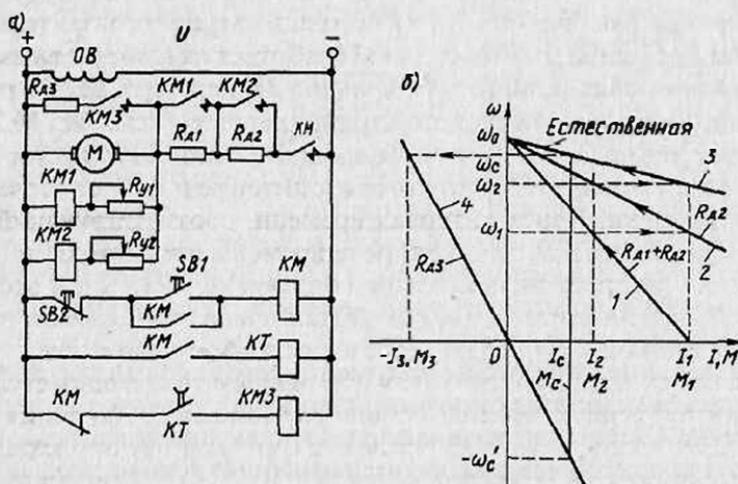


Рис. 10.26

Для осуществления торможения в схеме предусмотрен резистор  $R_{A3}$ , 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  $R_{A1} + R_{A2}$  по характеристике 1 (см. рис. 10.26, б). По мере увеличения скорости растет ЭДС двигателя и соответственно напряжение на катуш-

ках контакторов  $KM1$  и  $KM2$ . При скорости  $\omega_1$  срабатывает контактор  $KM1$ , закорачивая своим контактом первую ступень пускового резистора  $R_{д1}$ , и двигатель начинает работать по характеристике 2. При скорости  $\omega_2$  срабатывает контактор  $KM2$ , закорачивая вторую ступень пускового резистора  $R_{д2}$ . 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 нагрузки  $\omega(M_2)$ .

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  $R_{д3}$  к якорю  $M$ , переводя ДПТ в режим динамического торможения по характеристике 4 (см. рис. 10.26, 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 разомкнет цепь питания контактора  $KM3$ . При этом резистор  $R_{д3}$  отключается от якоря  $M$  двигателя, торможение заканчивается и схема возвращается в свое исходное положение.

Типовая схема пуска двигателя постоянного тока в одну ступень в функции времени и динамического торможения в функции ЭДС (рис. 10.27). Управление ДПТ при пуске в этом случае происходит по аналогии со схемой, приведенной на рис. 10.25. Отметим только, что при включении двигателя и работе его от источника питания размыкающий контакт линейного контактора  $KM$  в цепи контактора торможения  $KM2$  разомкнут, что предотвращает перевод двигателя в режим торможения.

Торможение осуществляется нажатием кнопки  $SB2$ . При этом контактор  $KM$ , потеряв питание, отключает двигатель от источника питания и замыкает своим контактом цепь питания катушки контактора  $KM2$ . Последний под действием наведенной в якоре ЭДС срабатывает и замыкает якорь  $M$  двигателя на резистор торможения  $R_{д2}$ . Процесс динамического торможения происходит до тех пор, пока при не-

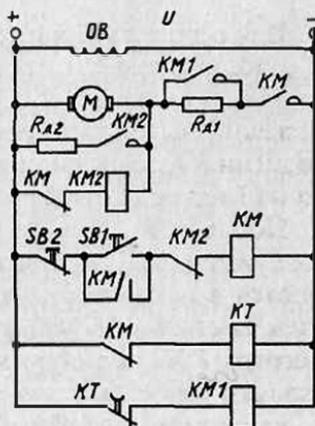


Рис. 10.27

большой скорости ДПТ его ЭДС не станет меньше напряжения отпущения контактора  $KM2$ , который отключится, и схема вернется в исходное положение.

Схема управления пуском ДПТ в функции времени, реверсом и торможением противовключением в функции ЭДС. В этой схеме (рис. 10.28, а) предусмотрено два линейных контактора  $KM1$  и  $KM2$ , обеспечивающих вращение двигателя соответственно вперед и назад. Главные контакты этих аппаратов образуют реверсивный мостик, с помощью которого можно изменять полярность напряжения на якоре  $M$ . В якорной цепи помимо пускового резистора  $R_{д1}$  включен резистор противовключения  $R_{д2}$ , который управляется контактором противовключения  $KM3$ .

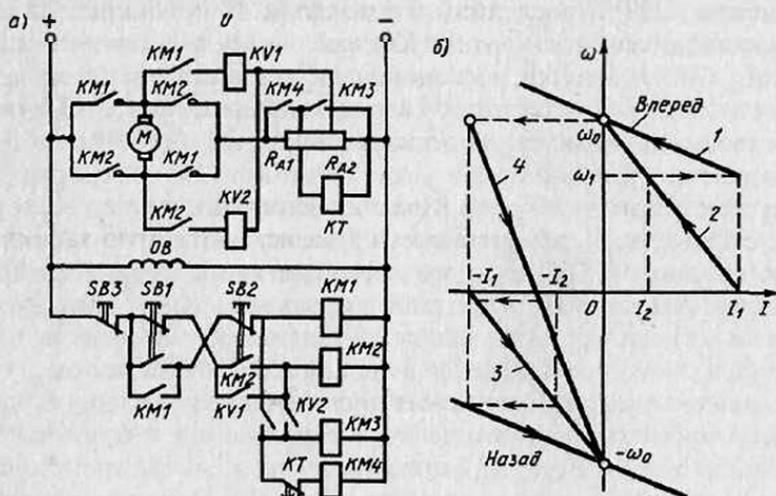


Рис. 10.28

Управление двигателем при торможении противовключением и реверсе осуществляется с помощью двух реле противовключения  $KV1$  и  $KV2$ . Их назначение заключается в том, чтобы в режиме противовключения обеспечить ввод в цепь якоря в дополнение к пусковому резистору  $R_{д1}$  резистора противовключения  $R_{д2}$ , что достигается выбором точки присоединения к нему катушек реле  $KV1$  и  $KV2$ .

Пуск ДПТ в любом направлении осуществляется в одну ступень в функции времени. При нажатии, например, кнопки  $SB1$  срабатывает контактор  $KM1$  и подключает якорь  $M$  к источнику питания. За счет падения напряжения на резисторе  $R_{д1}$  от пускового тока срабатывает реле времени  $KT$ , размыкающее свой контакт в цепи контактора  $KM4$ .

Срабатывание  $KM1$  приведет также к срабатыванию реле  $KV1$ , которое, замкнув свой замыкающий контакт в цепи контактора про-

тивовключения  $KM3$ , вызовет его включение, что приведет к закорачиванию ненужного при пуске резистора противовключения  $R_{д2}$  и одновременно катушки реле времени  $KT$ . При этом двигатель начнет разбег по характеристике 2 (см. рис. 10.28, б), а реле времени  $KT$  – отсчет выдержки времени.

По истечении требуемой выдержки времени реле  $KT$  замкнет свой контакт в цепи катушки контактора  $KM4$ , он включится, закоротит пусковой резистор  $R_{д1}$  и двигатель начнет работать по естественной характеристике 1.

Для осуществления торможения необходимо нажать кнопку  $SB2$ , в результате чего отключаются контактор  $KM1$ , реле  $KV1$ , контакторы  $KM3$  и  $KM4$  и включается контактор  $KM2$ . Напряжение на двигателе при этом изменяет свою полярность и он переходит в режим торможения противовключением с двумя резисторами в цепи якоря  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ . Несмотря на замыкание контакта  $KM2$  в цепи реле  $KV2$ , оно (за счет оговоренного выше подключения) не включается и тем самым не дает включиться аппаратам  $KM3$  и  $KM4$  и зашунтировать резисторы  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ .

Перевод ДПТ в режим противовключения соответствует его переходу с естественной характеристики 1 на искусственную характеристики 4 (см. рис. 10.28, б). Во всем диапазоне скоростей  $0 < \omega < \omega_0$  на этой характеристике двигатель работает в режиме противовключения.

По мере снижения скорости двигателя растет напряжение на катушке реле  $KV2$  и при скорости близкой к нулю оно достигнет значения напряжения срабатывания. Если к этому моменту времени кнопка  $SB2$  будет отпущена, то отключается контактор  $KM2$ , схема возвращается в исходное положение и на этом процесс торможения заканчивается. Если же при малой скорости кнопка  $SB2$  остается нажатой, то включается реле  $KV2$  и повторяется процесс пуска двигателя, но уже в противоположную сторону. Таким образом, реверсирование ДПТ включает в себя два этапа – торможение противовключением и пуск в противоположном направлении. Второй этап реверса соответствует на рис. 10.28, б переходу двигателя с характеристики 4 на характеристику 3, соответствующую обратной полярности напряжения на якоре двигателя и наличию в якоре добавочного резистора  $R_{д1}$ .

Типовая схема пуска ДПТ с последовательным возбуждением в функции тока. В этой схеме (рис. 10.29) катушка реле тока  $KA$  включена в цепь якоря  $M$ , а размыкающий контакт – в цепь питания контактора ус-

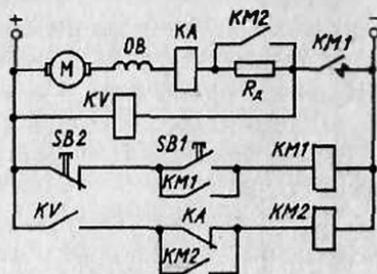


Рис. 10.29

корения  $KM2$ . Реле тока настраивается таким образом, чтобы его ток отпущения соответствовал току  $I_2$  (см. рис. 10.25, б). В схеме используется также дополнительное блокировочное реле  $KV$  с временем срабатывания больше, чем у реле  $KA$ .

При нажатии на кнопку  $SB1$  срабатывает контактор  $KM1$ , двигатель подключается к источнику питания и начинает свой разбег. Бросок тока в якорной цепи после замыкания главного контакта контактора  $KM1$  вызывает срабатывание реле тока  $KA$ , которое размыкает свой размыкающий контакт в цепи контактора  $KM2$ . Через некоторое время после этого срабатывает реле  $KV$  и замыкает свой замыкающий контакт в цепи контактора  $KM2$ , подготавливая его к включению.

По мере разбега двигателя ток якоря снижается до значения тока переключения  $I_2$ , при котором отключается реле тока, замыкая свой размыкающий контакт в цепи катушки контактора  $KM2$ . Последний срабатывает, его главный контакт закорачивает пусковой резистор  $R_d$  в цепи якоря, а вспомогательный контакт шунтирует контакт реле тока  $KA$ . Поэтому вторичное включение реле тока  $KA$  после закорачивания резистора  $R_d$  и броска тока не вызывает отключения контактора  $KM2$  и двигатель продолжает разбег по своей естественной характеристике.

Типовые релейно-контакторные схемы управления ЭП включают в себя элементы блокировок, защит, сигнализации, а также элементы связи с технологическим оборудованием. Для унификации схемных решений электротехническая промышленность выпускает стандартные станции, блоки и панели управления, специализированные по видам ЭП рабочих машин и механизмов, их функциональным возможностям, условиям эксплуатации, роду тока и др. Так, для управления крановыми механизмами выпускаются различные крановые панели, для лифтов разработаны типовые шкафы управления, для ЭП конвейеров выпускаются типовые станции управления и т.д. В качестве примера рассмотрим схему одного из таких типовых устройств.

**Схема управления, обеспечивающая пуск, динамическое торможение и регулирование скорости двигателя ослаблением магнитного потока.** Пуск ДПТ осуществляется в три ступени в функции времени, торможение – в функции ЭДС. Органом управления в этой схеме является командоконтроллер  $SA$ , имеющий четыре положения рукоятки – одно нулевое (начальное) и три рабочих (рис. 10.30).

Перед пуском командоконтроллер устанавливается в нулевое положение, затем включаются автоматические выключатели  $QF1$  и  $QF2$  и схема подключается к источнику питания. По обмотке возбуждения  $OB$  начинает протекать ток возбуждения и, кроме того,

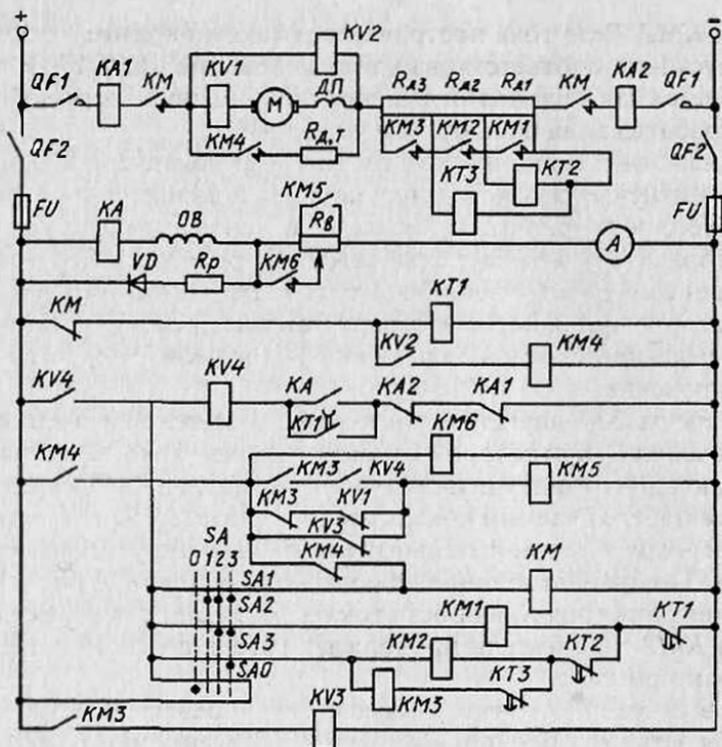


Рис. 10.30

срабатывает реле времени  $KT1$ , шунтируя в цепи реле контроля напряжения  $KV4$  своим контактом контакт реле обрыва цепи обмотки возбуждения  $KA$ . Если при этом реле максимального тока  $KA1$  и  $KA2$  находятся в нормальном (невключенном) положении, то срабатывает реле  $KV4$ , подготавливая питание схемы управления через свой замыкающий контакт. Если в процессе работы произойдет недопустимое снижение напряжения питания или тока возбуждения двигателя или ток в якоре превысит допустимый уровень, реле  $KV4$  отключится, схема управления лишится питания и ДПТ будет отключен от сети. Таким образом, реле  $KV4$  выполняет роль исполнительного элемента трех защит.

Для обеспечения разбега двигателя до максимальной скорости рукоятку командоконтроллера  $SA$  необходимо переместить в крайнее третье положение, что приведет к срабатыванию контактора  $KM$  и подключению якоря  $M$  к источнику питания, после чего он начнет свой разбег с полным сопротивлением пускового резистора в цепи якоря. Реле времени  $KT1$ , потеряв питание вследствие размыкания контакта  $KM$ , начнет отсчет выдержки

времени работы на первой ступени, а реле времени  $KT2$  и  $KT3$ , сработав от падения напряжения на резисторах  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ , разомкнут свои контакты в цепях контакторов ускорения  $KM2$  и  $KM3$ . Одновременно с этим включаются «экономический» контактор  $KM6$  и контактор управления возбуждением  $KM5$ , в результате чего шунтируется резистор  $R_{в}$  и пуск ДПТ происходит при полном магнитном потоке.

Через определенное время замкнется размыкающий контакт  $KT1$ , контактор  $KM1$  включится, зашунтирует первую ступень пускового резистора  $R_{д1}$  и одновременно катушку реле времени  $KT2$ . Последнее, отсчитав свою выдержку времени, включит контактор  $KM2$ , который зашунтирует вторую ступень пускового резистора  $R_{д2}$  и катушку реле  $KT3$ . Это реле, также отсчитав свою выдержку времени, вызовет срабатывание контактора  $KM3$  и шунтирование последней ступени пускового резистора, после чего ДПТ выйдет на свою естественную характеристику.

После шунтирования третьей ступени пускового резистора начинается ослабление магнитного потока, которое подготавливается включением реле  $KV3$  после срабатывания контактора  $KM3$ . В процессе ослабления тока возбуждения с помощью реле управления  $KV1$  обеспечивается контроль за током якоря. При бросках тока реле  $KV1$  обеспечивает включение или отключение контактора  $KM5$ , усиливая или ослабляя при этом ток возбуждения так, чтобы ток в якорной цепи не выходил за допустимые пределы. При размыкании контакта  $KM5$  часть тока возбуждения замыкается через диод  $VD$  и разрядный резистор  $R_{р}$ .

Торможение двигателя осуществляется перестановкой рукоятки командоконтроллера  $SA$  в нулевое положение, что приводит к выключению контактора  $KM$  и отключению якоря  $M$  от источника питания. Поскольку в процессе пуска двигателя реле динамического торможения  $KV2$  включается, замыкание размыкающего контакта  $KM$  в цепи контактора торможения  $KM4$  вызовет его включение. Резистор  $R_{дт}$  окажется подключенным к якорю  $M$  двигателя, который перейдет в режим динамического торможения. При малых скоростях ДПТ, когда его ЭДС станет ниже напряжения отпускания (удержания) реле  $KV2$ , оно отключится, выключит контактор  $KM4$ , и процесс торможения закончится. Отметим, что динамическое торможение происходит при полном магнитном потоке.

Для снижения скорости двигателя рукоятку командоконтроллера  $SA$  необходимо перевести в положение 1 или 2. При этом в положении 1 двигатель будет работать по искусственной характеристике, соответствующей наличию в цепи якоря резисторов  $R_{д2}$  и  $R_{д3}$ , а в положении 2 – по характеристике, обусловленной наличием резистора  $R_{д3}$ .

## 10.8. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Типовые схемы релейно-контакторного управления АД строятся по тем же принципам, что и схемы ДПТ.

**Типовые схемы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.** Двигатели этого типа малой и средней мощности обычно запускаются прямым подключением к сети без ограничения пусковых токов. В этих случаях они управляются с помощью магнитных пускателей, которые одновременно обеспечивают и некоторые виды их защиты.

*Схема управления асинхронным двигателем с использованием магнитного пускателя* (рис. 10.31) включает в себя магнитный пускатель, состоящий из контактора  $KM$  и двух встроенных в него тепловых реле защиты  $KK$ . Такая схема обеспечивает прямой (без ограничения тока и момента) пуск АД, отключение его от сети, а также защиту от коротких замыканий (предохранители  $FA$ ) и перегрузки (тепловые реле  $KK$ ).

Для пуска двигателя замыкается выключатель  $QF$  и нажимается кнопка пуска  $SB1$ . При этом получает питание катушка контактора  $KM$ , который, включившись, своими главными силовыми контактами в цепи статора подключает двигатель к источнику питания, а вспомогательным контактом шунтирует кнопку  $SB1$ . Происходит разбег асинхронного двигателя по его естественной характеристике. При нажатии кнопки остановки  $SB2$  контактор  $KM$  теряет питание и отключает АД от сети. Начинается процесс торможения асинхронного двигателя выбегом под действием момента нагрузки на его валу.

*Реверсивная схема управления асинхронным двигателем.* Основным элементом этой схемы является реверсивный магнитный пускатель, который включает в себя два линейных контактора  $KM1$  и  $KM2$  и два тепловых реле защиты  $KK$  (рис. 10.32). Такая схема обеспечивает прямой пуск и реверс асинхронного двигателя, а также торможение АД противотключением при ручном (неавтоматическом) управлении.

В этой схеме предусмотрена также защита от перегрузок АД (реле  $KK$ ) и коротких замыканий в цепях статора (автоматический выключа-

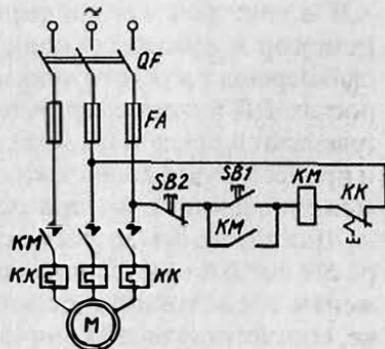


Рис. 10.31

тель  $QF$ ) и управления (предохранители  $FA$ ). Кроме того, в ней обеспечивается и нулевая защита от исчезновения (снижения) напряжения сети (контакторы  $KM1$  и  $KM2$ ).

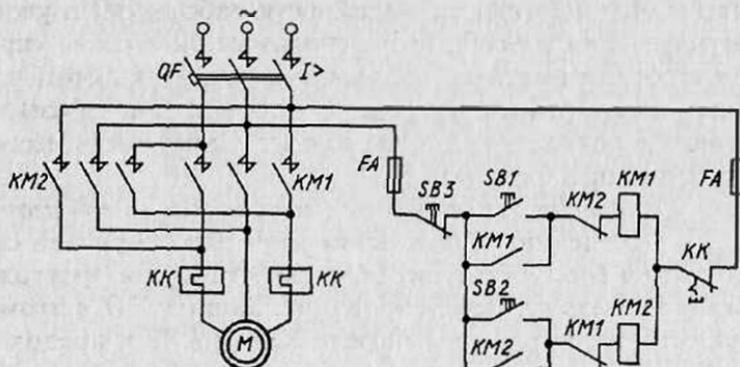


Рис. 10.32

Пуск двигателя в условных направлениях «Вперед» или «Назад» осуществляется нажатием соответственно кнопок  $SB1$  или  $SB2$ , что приводит к срабатыванию контакторов  $KM1$  или  $KM2$  и подключению АД к сети (при включенном автоматическом выключателе  $QF$ ).

Для обеспечения реверса или торможения двигателя сначала нажимается кнопка  $SB3$ , что приводит к отключению включенного до тех пор контактора (например,  $KM1$ ), а затем – кнопка  $SB2$ , что приводит к включению контактора  $KM2$  и подаче на АД напряжения питания с другим чередованием фаз. После этого магнитное поле двигателя изменяет свое направление вращения и начинается процесс реверса, состоящий из двух этапов – торможения противовключением и разбега в противоположную сторону.

В случае необходимости только затормозить двигатель при достижении им нулевой скорости следует вновь нажать кнопку  $SB3$ , что приведет к отключению его от сети и возвращению схемы в исходное положение. Если же кнопку  $SB3$  не нажимать, последует разбег АД в другую сторону, т.е. его реверс.

Во избежание короткого замыкания в цепи статора, которое может возникнуть в результате одновременного ошибочного нажатия кнопок  $SB1$  и  $SB2$ , в реверсивных магнитных пускателях иногда предусматривается специальная механическая блокировка. Она представляет собой рычажную систему, которая предотвращает одновременное включение двух контакторов. В дополнение к механической в такой схеме используется типовая электрическая блокировка, применяемая в реверсивных схемах упра-

вления, которая заключается в перекрестном включении замыкающих контактов аппарата  $KM1$  в цепь катушки аппарата  $KM2$  и наоборот.

Отметим, что повышению надежности работы ЭП и удобства его в эксплуатации способствует использование в схеме управления воздушного автоматического выключателя  $QF$ , который исключает возможность работы привода при обрыве одной фазы и при однофазном коротком замыкании, как это может иметь место при использовании предохранителей.

Схема управления двухскоростным асинхронным двигателем (рис. 10.33) обеспечивает получение двух его скоростей соединением секций (полуобмоток) обмотки статора в треугольник или двойную звезду и реверсирование. Защита ЭП в этом случае осуществляется тепловыми реле  $KK1$  и  $KK2$  и предохранителями  $FA$ .

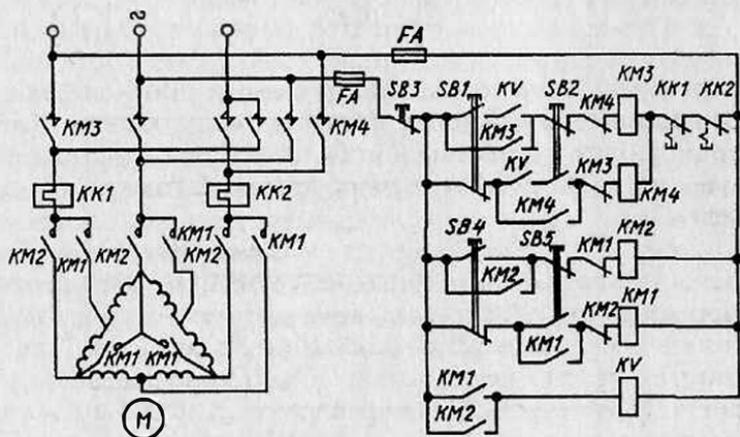


Рис. 10.33

Для обеспечения пуска АД и вращения его с малой скоростью необходимо нажать кнопку  $SB4$ , после чего сработают контактор  $KM2$  и блокировочное реле  $KV$ . При этом статор двигателя включится по схеме треугольника, а реле  $KV$ , замкнув свои контакты в цепях катушек аппаратов  $KM3$  и  $KM4$ , подготовит подключение его к источнику питания. Нажатие кнопок  $SB1$  или  $SB2$  определит соответственно направление пуска вперед или назад.

Разгон двигателя до высокой скорости осуществляется при нажатии кнопки  $SB5$ , которая отключит контактор  $KM2$  и включит контактор  $KM1$ , т.е. обеспечит переключение секций обмоток статора со схемы треугольника на схему двойной звезды.

Остановка АД производится нажатием кнопки *SB3*, которая отключит все контакторы и сам двигатель от сети.

Применение в данной схеме двухцепных кнопок управления не допускает одновременного включения контакторов *KM1* и *KM2*, *KM3* и *KM4*. Этой же цели служит перекрестное включение размыкающих блок-контактов контакторов *KM1* и *KM2*, *KM3* и *KM4* в цепи их катушек.

Типовая схема управления асинхронным двигателем, обеспечивающая его прямой пуск и динамическое торможение в функции времени (рис. 10.34). 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 срабатывает, так как в этой цепи разомкнулся размыкающий контакт *KM*.

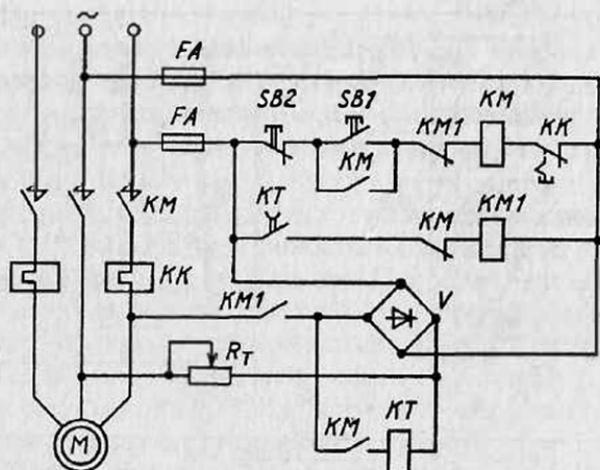


Рис. 10.34

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 *KT*, что приведет к включению контактора торможения *KM1*, подаче в обмотки статора постоянного тока от выпрямителя *V* через резистор *R<sub>T</sub>* и переводу двигателя в режим динамического торможения.

Реле времени *KT*, потеряв питание, начнет отсчет выдержки времени. Через некоторый интервал времени, соответствующий вре-

мени останова двигателя, реле  $KT$  разомкнет свой контакт в цепи контактора  $KM1$ , тот отключится и прекратит подачу постоянного тока в цепь статора. Схема вернется в исходное положение.

Интенсивность динамического торможения регулируется резистором  $R_p$ , 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  $KM$  и  $KM1$ , 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. 10.35) работает следующим образом. После подачи напряжения происходит включение реле времени  $KT$ , которое своим размыкающим контактом разрывает цепь питания контактора  $KM3$ , предотвращая тем самым его включение и преждевременное закорачивание пусковых резисторов в цепи ротора.

При нажатии кнопки  $SB1$  включается контактор  $KM1$ , статор подается к сети, электромагнитный тормоз  $YB$  растормаживает-

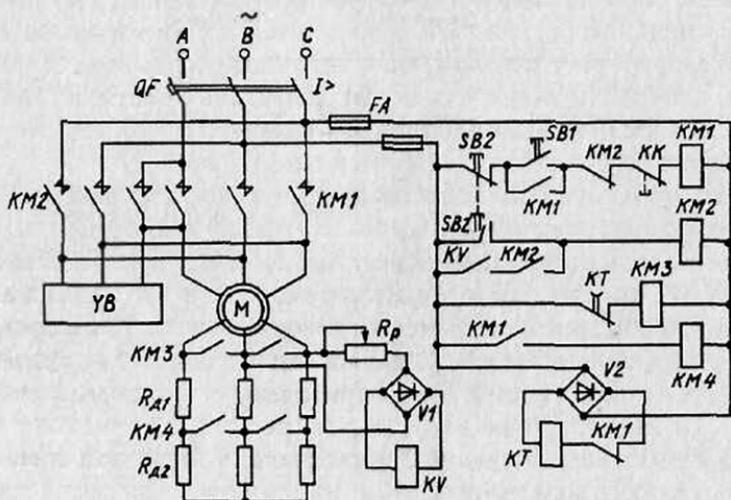


Рис. 10.35

ся и начинается разбег двигателя. Включение контактора  $KM1$  одновременно приводит к срабатыванию контактора  $KM4$ , который своими контактами шунтирует ненужный при пуске резистор противовключения  $R_{a2}$ , 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  $R_{a1}$  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 двоящую 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  $R_{a1}$  и  $R_{a2}$ .

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 отпускания 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. 10.36) включает в себя контакторы  $KM1$ ,  $KM2$  и  $KM3$ , реле тока  $KA$ , 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  $KK1$  и  $KK2$ .

Схема работает следующим образом. После подачи с помощью автоматического выключателя  $QF$  напряжения для пуска двигателя нажимается кнопка  $SB1$ , т.е. включается контактор  $KM1$ , силовыми контактами которого статор двигателя подключается к сети.

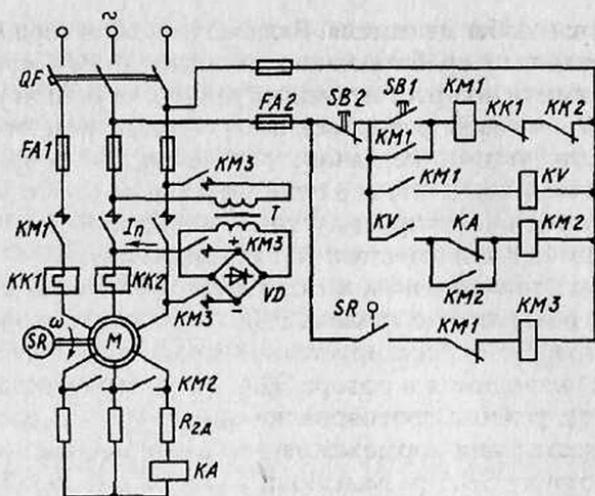


Рис. 10.36

Бросок тока в цепи ротора вызывает включение реле тока  $KA$  и размыкание цепи контактора ускорения  $KM2$ , т.е. разбег двигателя начнется с пусковым резистором  $R_{2н}$  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, шунтирует пусковой резистор  $R_{2н}$ , 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  $R_{2л}$  и двигатель начнет тормозиться.

При скорости двигателя близкой к нулю реле контроля скорости *SR* разомкнет свой контакт в цепи катушки контактора *КМ3*, 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 *КА* включить в фазу статора, а не ротора.

Панель типа ПДУ6220 (рис. 10.37) входит в состав нормализованной серии панелей управления АД с фазным и короткозамкнутым ротором и обеспечивает их пуск в две ступени и динамическое торможение в функции времени.

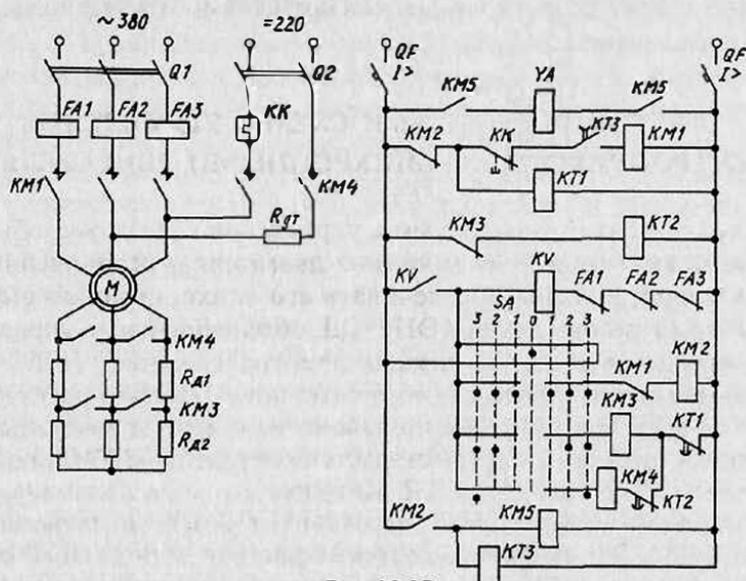


Рис. 10.37

При подаче на схему напряжения постоянного тока 220 В и напряжения переменного тока 380 В рубильниками *Q1*, *Q2* и автоматом *QF* включается реле времени *KT1*, подготавливая двигатель к пуску с полным пусковым резистором в цепи ротора. Одновременно, если рукоятка командоконтроллера находится в нулевой (средней) позиции и максимально-токовые реле *FA1*...*FA3* не включены, срабатывает реле защиты *KV* от понижения питающего напряжения, подготавливая схему к работе.

Пуск двигателя осуществляется по одной из искусственных или естественной характеристике, для чего рукоятка *SA* соответственно устанавливается в положения 1, 2 или 3. При этом включаются линейный контактор *КМ1*, подключающий АД к сети, контактор управления тормозом *КМ5*, подключающий к сети катушку *YA* электромагнитного тормоза, который при этом растормаживает двига-

тель, и реле времени  $KTЗ$ , управляющее процессом динамического торможения. При переводе рукоятки  $SA$  в положение 2 или 3 включаются также контакторы ускорения  $KM3$  и  $KM4$  и двигатель начинает разгоняться.

Торможение двигателя происходит при переводе рукоятки  $SA$  в нулевое (среднее) положение. При этом отключаются контакторы  $KM2$  и  $KM5$  и включается контактор динамического торможения  $KM4$ , который подключает АД к источнику постоянного тока. В результате происходит процесс комбинированного (механического и динамического) торможения двигателя, который заканчивается после отсчета реле  $KTЗ$  выдержки времени, соответствующей времени торможения.

## 10.9. 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. 10.38, 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

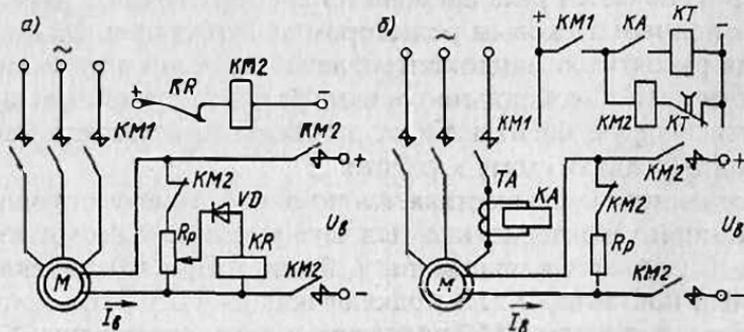


Рис. 10.38

$KR$  начинает протекать выпрямленный ток, оно включается и размыкает цепь питания контактора  $KM2$ , т.е. разбег двигателя происходит без тока возбуждения с закороченной на разрядный резистор  $R_p$  обмоткой возбуждения.

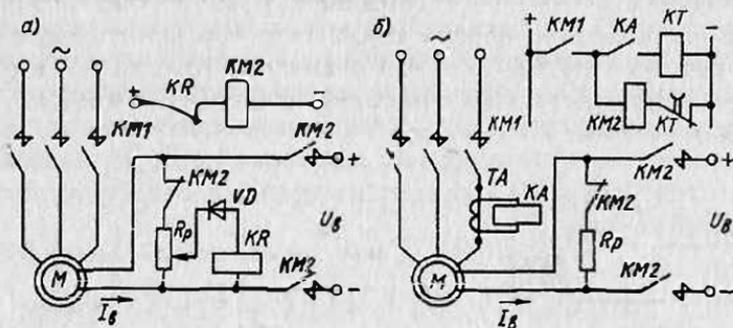


Рис. 10.38

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 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. 10.38, 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 закороченной 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.

Электротехническая промышленность выпускает типовые панели и шкафы управления СД разных типов. Рассмотрим в качестве

примера схему панели управления низковольтным СД серии ПУ 7502 (рис. 10.39), которая обеспечивает его прямой (без токоограничения) пуск с глухоподключенным возбудителем  $G$ , имеющим независимую  $НОВ$  и последовательную  $ПОВ$  обмотки возбуждения, и форсировку возбуждения при снижении уровня питающего напряжения. В схеме предусмотрены также тепловая защита (реле  $КК$  и трансформаторы тока  $ТА1$  и  $ТА2$ ), токовая (автоматы  $QF1$  и  $QF2$ ) и защиты от снижения напряжения сетей переменного (реле  $KV2, KV3$ ) и постоянного (реле  $KV1$ ) токов.

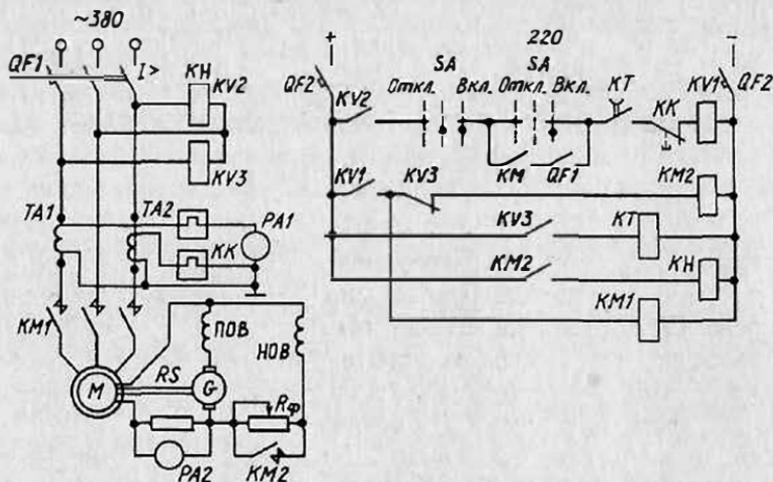


Рис. 10.39

Пуск СД возможен только при нормальных уровнях питающих схему напряжений постоянного и переменного токов. В этом случае, если рукоятка командоконтроллера  $SA$  находится в среднем положении и включены автоматы  $QF1$  и  $QF2$ , срабатывают реле напряжения  $KV2, KV3$  и реле времени  $KT$ , подготавливая схему к пуску. При переводе рукоятки  $SA$  в положение «Вкл.» срабатывает реле  $KV1$  и катушка линейного контактора  $KM1$  подключается к источнику питания, одновременно к обмотке статора СД подводится напряжение переменного тока и тот начинает разбег. При подсинхронной скорости происходит возбуждение возбудителя  $G$  и соответственно двигателя, т. е. начинается процесс синхронизации его с сетью.

Работа данной схемы при резком снижении питающего напряжения рассмотрена в разд. 10.5 (см. рис. 10.17). О включении контактора форсировки  $KM2$  сигнализирует указательное реле  $КН$ . Для контроля тока статора в схеме предусмотрен амперметр  $PA1$ , а тока возбуждения – амперметр  $PA2$ , питаемый от шунта  $RS$ .

**Задача 10.1.** Составить схему управления, которая обеспечит пуск ДПТНВ в одну ступень в функции ЭДС и его торможение противовключением в функции времени.

**Задача 10.2.** Составить схему управления, которая обеспечит пуск ДПТНВ в две ступени в функции времени и его динамическое торможение в функции скорости (с использованием реле контроля скорости).

**Задача 10.3.** Составить схему управления, которая обеспечит пуск АД с фазным ротором в две ступени в функции времени и его торможение противовключением в функции скорости (с использованием реле контроля скорости).

**Задача 10.4.** Составить схему управления, которая обеспечит прямой пуск АД с короткозамкнутым ротором и его торможение противовключением в функции времени.

## 10.10. 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 выбирать из соотношения

$$I_{у.м} \geq k_n I_{пуск} \quad (10.2)$$

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:

$$I_{у.т} = (1,2 \dots 1,4) I_{ном} \quad (10.3)$$

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

$$I_{п.в} = I_{пуск} / 2,5, \quad (10.4)$$

а при времени пуска большем 5 с

$$I_{п.в} = I_{пуск} / (1,6 \dots 2). \quad (10.5)$$

Для АД с фазным ротором и ДПТ обычного исполнения ток плавкой вставки рассчитывается по отношению к номинальному току:

$$I_{п.в} \geq (1 \dots 1,25) I_{ном}. \quad (10.6)$$

Для защиты цепей управления ток плавкой вставки выбирается из условия

$$I_{п.в} = 2,5 I_c, \quad (10.7)$$

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

$$I_{у.т} = (1,2 \dots 1,3) I_{пуск}, \quad (10.8)$$

а для АД с фазным ротором и ДПТ

$$I_{у.т} = (2 \dots 2,5) I_{ном}. \quad (10.9)$$

Более подробно выбор аппаратов рассмотрен в [22].

### Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняют в основном разомкнутые схемы управления ЭП?
2. По каким принципам строятся разомкнутые схемы управления пуском, реверсом и торможением двигателей?
3. Перечислите и поясните действие аппаратов ручного управления.
4. Перечислите и опишите принцип действия аппаратов дистанционного управления.
5. Перечислите и поясните действие датчиков координат ЭП.
6. Какие виды защит используются в схемах управления ЭП?
7. С помощью каких аппаратов реализуются различные виды защит в ЭП?
8. Назовите типичные блокировки, применяемые в схемах управления ЭП.
9. Какие типовые операции по преобразованию электрических сигналов выполняют бесконтактные логические элементы?
10. Какие виды силовых резисторов применяются в схемах ЭП?
11. Какие виды тормозных устройств применяются в ЭП?
12. Поясните принцип действия электрогидравлического толкателя.
13. Проверьте свое понимание порядка работы типовых релейно-контакторных схем управления двигателями постоянного тока, решив задачи 10.1 ... 10.4.
14. Проверьте свое понимание работы релейно-контакторных схем управления при наличии в них неисправностей (например, обрыв цепей катушек контакторов и реле, приваривание их контактов, перегорание предохранителей и др.).

## Глава 11. ЗАМКНУТЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Замкнутые схемы применяются в тех случаях, когда требуется обеспечить управление движением исполнительных органов рабочих машин с высокими качеством (большой 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).

### 11.1. 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  $\omega$  (рис. 11.1, а). Основным признаком такой замкнутой структуры ЭП является наличие цепи, по которой на вход ЭП вместе с задающим сигналом скорости  $U_{3,c}$  подается сигнал, пропорциональный моменту нагрузки:  $U_M = k_M M_c$ , где  $k_M$  – коэффициент пропорциональности. В результате управление ЭП осуществляется суммарным сигналом  $U_\Delta$ , который, автоматически изменяясь при колебаниях момента нагрузки, обеспечивает поддержание скорости ЭП на заданном уровне.

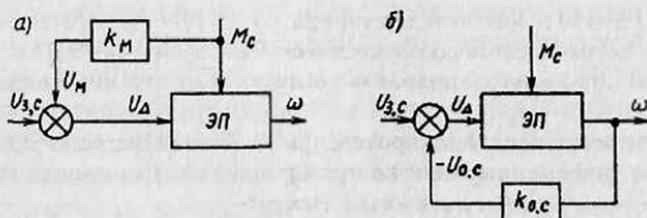


Рис. 11.1

Несмотря на эффективность, управление ЭП по схеме, приведенной на рис. 11.1, а, 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 (см. рис. 11.1, б), по которой информация о текущем значении скорости (сигнал обратной связи  $U_{o.c} = k_{o.c} \omega$ ) подается на вход ЭП, где он вычитается из сигнала задания скорости  $U_{з.с}$ . Управление осуществляется сигналом отклонения  $U_{\Delta} = U_{з.с} - U_{o.c}$  (его также называют сигналом рассогласования или ошибки), который при отличии скорости от заданной соответственно автоматически изменяется и с помощью системы управления ЭП устраняет эти отклонения.

При необходимости регулирования других координат ЭП или рабочей машины используются обратные связи по этим координатам.

Все применяемые в замкнутом ЭП обратные связи делятся на положительные 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 («-» на рис. 11.1, б).

*Жесткая* обратная связь действует как в установившемся, так и в 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  $U_{o.c}$ , 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. 11.2). В этой системе ЭП является силовым регулирующим устройством, выходная координата которого  $X_{вых}$  (например, скорость) является управляющим воздействием для

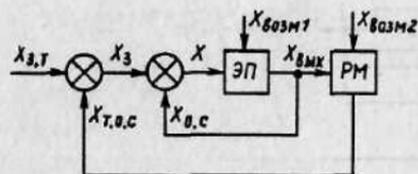


Рис. 11.2

рабочей машины РМ и обеспечивает заданный ход технологического процесса при изменениях как его задающего сигнала  $X_{з,т}$ , так и возмущающего воздействия  $X_{в,в.с2}$ . Сигналом задания для ЭП в этом случае является сигнал отклонения (рассогласования) между задающим сигналом

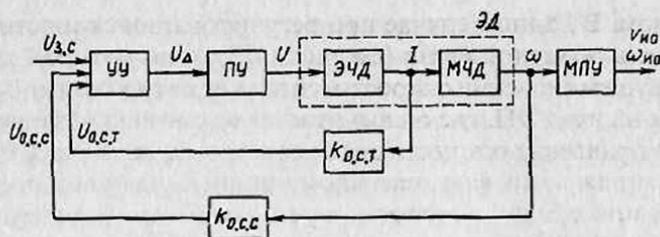


Рис. 11.3

технологического параметра  $X_{3,t}$  и сигналом технологической обратной связи  $X_{1,o,c}$ . 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.

*Схема ЭП с общим усилителем* (рис. 11.3). Принятые на схеме обозначения элементов соответствуют общей схеме ЭП на рис. 1.1, за исключением электродвигателя, представленного для удобства анализа в виде двух частей – электрической ЭЧД и механической МЧД. Схема обеспечивает регулирование двух координат ЭП – скорости и тока (момента). В этой схеме сигналы обратных связей по току  $U_{o,c,t}$  и скорости  $U_{o,c,c}$  подаются на вход управляющего устройства УУ вместе с задающим сигналом скорости  $U_{3,c}$ , 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. 11.4) принципиально отличается от предыдущей. В ней регулирование каждой координаты осуществляется собственными регуляторами (тока

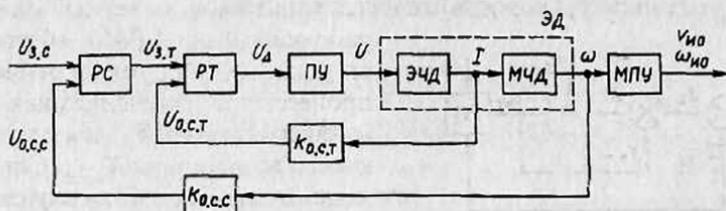


Рис. 11.4

$PT$ , скорости  $PC$ ), которые вместе с соответствующими обратными связями образуют замкнутые контуры. Эти контуры располагаются таким образом, чтобы входным (задающим) сигналом для контура тока  $U_{\text{з.т}}$  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).

Для регулирования положения вала двигателя в схемы, приведенные на рис. 11.3 и 11.4, 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.

## 11.2. 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 широ-

кими 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 симисторы (англ. TRIAC), эквивалентные двум встречно-параллельно включенным тиристорам, оптоотиристоры, управляемые световым потоком, быстрodeйствующие высокочастотные тиристоры и др. Наряду с этими неполноуправляемыми 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; датчики 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.

### 11.3. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Работу таких элементов и устройств рассмотрим на примере систем УБСР.

Аналоговая ветвь УБСР-А выполняется из набора транзисторных усилителей постоянного тока, командных и задающих устройств, функциональных преобразователей, датчиков координат, устройств согласования и блоков питания и рассчитана на унифицированный сигнал постоянного тока ( $0 \pm 10$ ) мА, ( $0 \pm 24$ ) В, что позволяет использовать в ней транзисторы общего назначения.

Развитием аналоговой ветви УБСР явилась разработка серии УБСР-АИ на интегральных микросхемах, применение которых по-

зводило улучшить технические характеристики схем управления и расширить их функциональные возможности. Блоки УБСР-АИ размещаются на сменных ячейках со штепсельными разъемами и имеют печатный монтаж. Эта серия рассчитана на унифицированный электрический сигнал  $\pm 10$  В,  $\pm 5$  мА, позволяющий соединять ее элементы с дискретными элементами УБСР-ДИ и другими устройствами автоматизации технологических процессов.

**Операционный усилитель (ОУ)** является основным элементом аналоговой системы. Он представляет собой усилитель постоянного тока с очень большим коэффициентом усиления (до 10 000), охваченный отрицательной обратной связью.

Операционный усилитель, включенный по схеме, приведенной на рис. 11.5, осуществляет преобразование входных сигналов  $U_{\text{вх}i}$  в соответствии с выражением

$$U_{\text{вых}} = -z_{\text{о.с}} \sum_1^n (U_{\text{вх}i} / z_{\text{вх}i}), \quad (11.1)$$

где  $n$  – число входных сигналов;  $z_{\text{вх}i}$  – в общем случае комплексные активно-емкостные входные сопротивления ОУ,  $z_{\text{о.с}}$  – комплексное сопротивление цепи обратной связи.

В простейшем случае, когда на вход ОУ поступает один сигнал  $U_{\text{вх}}$ , а  $z_{\text{о.с}} = R_{\text{о.с}}$  и  $z_{\text{вх}1} = R_1$ , преобразование входного сигнала будет иметь вид

$$U_{\text{вых}} = -R_{\text{о.с}} U_{\text{вх}} / R_1 = -k U_{\text{вх}}, \quad (11.2)$$

т.е. происходит его умножение на коэффициент  $k = R_{\text{о.с}} / R_1$  и изменение знака на противоположный. При  $R_{\text{о.с}} = R_1$  и  $k = 1$  имеет место так называемое инвертирование входного сигнала по знаку.

Если  $z_{\text{о.с}} = R_{\text{о.с}}$  и  $z_{\text{вх}i} = R_{\text{вх}i}$ , то ОУ осуществляет суммирование подаваемых на него электрических сигналов с одновременным умножением на соответствующий коэффициент, т.е.

$$U_{\text{вых}} = -\sum_1^n (U_{\text{вх}i} k_i), \quad (11.3)$$

где  $k_i = R_{\text{о.с}} / R_{\text{вх}i}$ .

При включении во входные цепи и цепи обратных связей наряду с резисторами конденсаторов ОУ могут осуществлять и другие весьма разнообразные преобразования входных сигналов, необходимые для получения требуемых управляющих воздействий в ЭП. Такие схемы получили название регуляторов. В табл. 11.1 приведены некоторые распространенные схемы регуляторов с использованием ОУ.

**Регуляторы** получили свои названия в зависимости от выполняемых ими функциональных преобразований входных сигналов.

*Пропорциональный (П) регулятор* осуществляет рассмотренное выше масштабное (пропорциональное) преобразование входного сигнала с коэффициентом  $k = R_{oc}/R_1$  и инвертированием его знака. В таблице показан характер изменения во времени выходного сигнала этого регулятора при подаче на него ступенчатого входного сигнала в момент времени  $t_0$ . Выходной сигнал в этом случае повторяет входной с коэффициентом преобразования  $k$ . Отметим, что зависимость  $U_{вых}(t)$  при подаче на вход регулятора ступенчатого входного сигнала получила название его переходной функции.

*Интегральный (И) регулятор.* Для реализации этого регулятора в цепь обратной связи ОУ включается конденсатор  $C_{oc}$ , а во входную цепь – резистор  $R_1$ . В результате регулятор приобретает свойства интегрирующего устройства и напряжение на его выходе определяется интегралом от входного сигнала.

*Дифференциальный (Д) регулятор.* Схема соединения этого регулятора обеспечивает дифференцирование входного сигнала с коэффициентом  $T = R_{oc}C_1$ . Переходная характеристика идеального дифференциального регулятора представляет собой электрический импульс бесконечно большой амплитуды и малой длительности (для упрощения в таблице график входного сигнала  $U_{вх}(t)$  не показан).

*Апериодический (А) регулятор.* Переходной функцией такого регулятора является экспоненциальная зависимость выходного сигнала во времени.

Схемы и характеристики *пропорционально-интегрального (ПИ), пропорционально-дифференциального (ПД) и пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регуляторов* также приведены в табл. 11.1 Эти регуляторы осуществляют комплексное преобразование входных сигналов, что требуется при реализации сложных законов управления в ЭП.

Для реализации схем регуляторов в УБСР-АИ применяются ячейки операционных усилителей У2-АИ и У4-АИ, содержащие по два усилителя на микросхемах К1УТ402А, а также элементы цепей входа, обратной связи ОУ и ограничения выходного сигнала.

**Функциональные преобразователи** входят в состав УБСР-АИ и позволяют возводить в квадрат и извлекать квадратный корень из входного сигнала (ячейка ПК-1АИ), умножать и делить входные аналоговые сигналы (ячейки УМ-1АИ, УМ-2АИ, МДУ-1АИ), выделять модуль сигнала (ячейка ВМ-1АИ), осуществлять различные нелинейные зависимости между входным и выходным сигналами (ячейка ПФ-1АИ). Эти преобразователи также реализуются на базе одного или нескольких ОУ.

Другие нелинейные преобразователи электрических сигналов можно также получить с помощью многочисленных схем, реализуемых на основе ОУ. Для примера рассмотрим схему включения ОУ

Таблица 11.1

Тип регулятора	Схема	Вид преобразования	Параметры регулятора	Переходная функция
П		$U_{\text{вых}} = kU_{\text{вх}}$	$k = R_{0.c}/R_1$	
И		$U_{\text{вых}} = \frac{1}{T} \int U_{\text{вх}} dt$	$T = R_1 C_{0.c}$	
Д		$U_{\text{вых}} = T \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$	$T = R_{0.c} C_1$	
А		$U_{\text{вых}} = kU_{\text{вх}} + \frac{1}{T} \int U_{\text{вх}} dt$	$k = R_{0.c}/R_1$ $T = R_{0.c} C_{0.c}$	
ПИ		$U_{\text{вых}} = k(U_{\text{вх}} + \frac{1}{T} \int U_{\text{вх}} dt)$	$k = R_{0.c}/R_1$ $T = R_{0.c} C_{0.c}$	
ПД		$U_{\text{вых}} = k(U_{\text{вх}} + T dU_{\text{вх}}/dt)$	$k = R_{0.c}/R_1$ $T = R_1 C_1$	
ПИД		$U_{\text{вых}} = k(U_{\text{вх}}(1 + T_2/T_1) + T dU_{\text{вх}}/dt + \frac{1}{T} \int U_{\text{вх}} dt)$	$k = R_{0.c}/R_1$ $T_1 = R_{0.c} C_{0.c}$ $T_2 = R_1 C_1$	

(рис. 11.6, а), обеспечивающую ограничение сигнала. Для выполнения этой функции в цепь обратной связи ОУ параллельно резистору  $R_{oc}$  включаются два стабилитрона  $VD1$  и  $VD2$ . До уровня выходного напряжения, соответствующего напряжению пробоя (стабилизации) стабилитронов  $U_{ст}$ , ОУ работает как обычный масштабный преобразователь с линейной характеристикой  $U_{вых}$  ( $U_{вх}$ ) (см. рис. 11.6, б). При достижении выходным напряжением уровня  $U_{ст}$  происходит пробой стабилитрона, эквивалентное сопротивление цепи обратной связи, а значит, в соответствии с (11.3), и коэффициент усиления ОУ становятся равными нулю, и напряжение на выходе перестает изменяться (ограничивается). Включение двух стабилитронов обеспечивает получение симметричной характеристики  $U_{вых}$  ( $U_{вх}$ ). Если убрать из цепи обратной связи резистор  $R_{oc}$ , то схема будет обеспечивать получение нелинейной характеристики типа релейной без зоны нечувствительности. Сигнал  $U_{ст}$  на выходе такой схемы будет появляться сразу же, как только поступит входной сигнал.

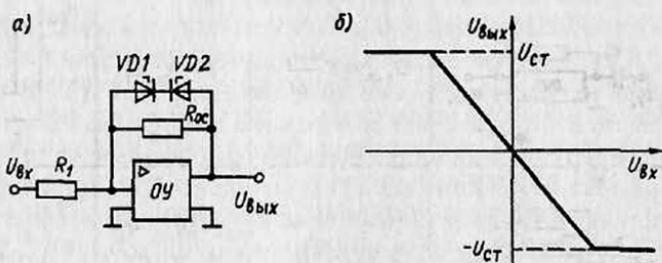


Рис. 11.6

В ряде схем нелинейного преобразования сигналов вместо стабилитронов используются диоды с потенциометрами опорного (запирающего) напряжения. На рис. 11.7, а приведена схема, в которой используются диоды  $VD1$  и  $VD2$  и потенциометр опорных напряжений ПОН. Диоды включаются таким образом, чтобы опорные напряжения  $\pm U_{оп}$ , снимаемые с ПОН, запирали их, так как со-

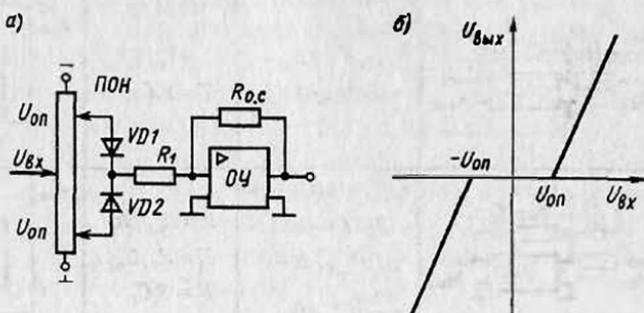


Рис. 11.7

здается более низкий потенциал их анодов по сравнению с потенциалом катодов. Поэтому до тех пор, пока входной сигнал  $U_{вх}$  будет меньше опорного  $U_{оп}$ , диоды остаются закрытыми и на выходе ОУ напряжение отсутствует. Как только  $U_{вх}$  становится больше  $U_{оп}$ , открывается один из диодов и на выходе ОУ появляется напряжение, изменяющееся далее линейно с коэффициентом усиления  $k = R_{о.с} / R_1$ . Характеристика, показанная на рис. 11.7, б, называется характеристикой с зоной нечувствительности. Изменяя уровни напряжения  $U_{оп}$ , а также коэффициент усиления  $k$ , можно обеспечить различные ее виды.

Объединение схем, приведенных на рис. 11.6, а и 11.7, а, позволяет получить характеристику  $U_{вых}(U_{вх})$ , соответствующую трехпозиционному релю с зоной нечувствительности.

**Командные (задающие) устройства** реализуются на базе сельсинного командоаппарата типа СКА. Они выпускаются в трех исполнениях – с приводом от рукоятки (СКАР), pedalным приводом (СКАП) и маховичковым приводом (СКАЗ).

Рассмотрим электрическую схему сельсинного командоаппарата (рис. 11.8, а). Однофазная обмотка статора сельсина  $OC$  подключается к сети переменного тока напряжением  $U_c \approx 110$  В частотой 50 Гц. Выходное напряжение переменного тока  $U_{вх}$  снимается с двух фаз обмотки ротора и далее выпрямляется с помощью неуправляемого выпрямителя  $VD$  или фазочувствительного выпрямителя  $\Phi Ч В$ . В первом случае выходное напряжение  $U_{вых1}$  будет иметь постоянную полярность, а во втором случае полярность сигнала  $U_{вых2}$  будет зависеть от сдвига фаз напряжений статора и ротора. Таким образом,  $\Phi Ч В$  является по существу выпрямителем, полярность сигнала

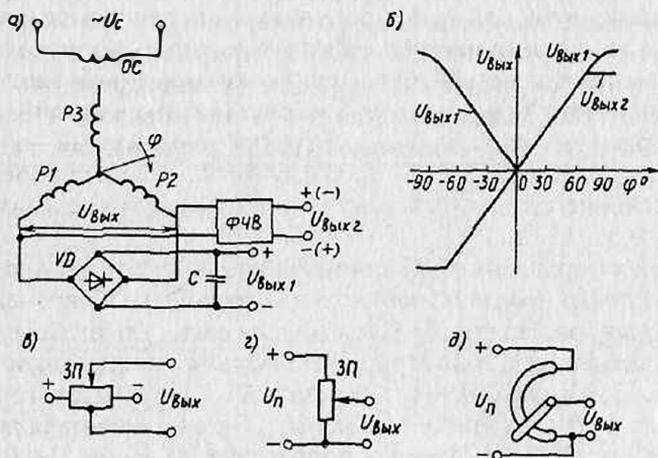


Рис. 11.8

на выходе которого определяется фазой входного напряжения переменного тока.

При повороте ротора сельсина амплитуда наводимых в его обмотках ЭДС и соответственно выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  изменяется от нуля в начальном положении ротора ( $\varphi = 0$ ) до максимального значения при  $\varphi = 90^\circ$  (см. рис. 11.8, б) по кривой  $U_{\text{вых}1}(\varphi)$ . Для получения примерно линейной зависимости выходного сигнала командоаппарата в функции угла поворота ротора используется зона  $\varphi = \pm 60^\circ$ .

На основе сельсинного командоаппарата выполняются и задатчики интенсивности УБСР типов БЗС и БСШД. В задатчике интенсивности БЗС ротор перемещается однофазным реверсивным исполнительным двигателем типа РД-09, а в задатчике БСШД – с помощью шагового двигателя типа ШДР 711.

В схемах управления, в том числе и в УБСР, широко используются и потенциометрические задающие устройства (задатчики) с линейным и вращательным движением ползунка. Схема, приведенная на рис. 11.8, в, обеспечивает получение двухполярного сигнала на выходе, а схемы на рис. 11.8, г, д – однополярного.

Если ползунки потенциометров перемещать с помощью исполнительных двигателей, то они смогут выполнять функции задатчиков интенсивности. По такому принципу в УБСР выполнен блок скорости реостатный (БСР), в котором двигатель РД-09 через редуктор перемещает ползунки двух потенциометров типа РПП. Угол поворота валиков потенциометра  $0 \dots 300^\circ$ , крайние их положения ограничиваются микровыключателями.

В УБСР предусмотрен и статический (без применения двигателя) задатчик интенсивности типа ЗИ-2АИ. В этом устройстве, предназначенном для преобразования ступенчатого входного сигнала в линейно изменяющееся во времени выходное напряжение, применяются четыре ОУ, один из которых работает в режиме управляемого ограничения (см. рис. 11.6, а), второй – в режиме интегратора (см. табл. 11.1), а третий и четвертый – в режиме инвертора. Ячейка ЗИ-2АИ операционного усилителя обеспечивает изменение своего выходного напряжения в пределах  $\pm 10$  В за время  $0,5 \dots 120$  с.

В схемах управления ЭП применяются также задатчики интенсивности, построенные на эффекте протекающего во времени заряда конденсатора. На рис. 11.9, а показана схема простейшего задатчика интенсивности, в котором используются конденсатор  $C$  и резистор  $R$ . При подаче на вход цепочки  $R - C$  ступенчатого входного сигнала  $U_{\text{вх}}$  сигнал на ее выходе  $U_{\text{вых}}$  будет изменяться по экспоненте (см. рис. 11.9, б). Изменяя постоянную времени  $T = RC$ , можно получать различный темп изменения выходного сигнала.

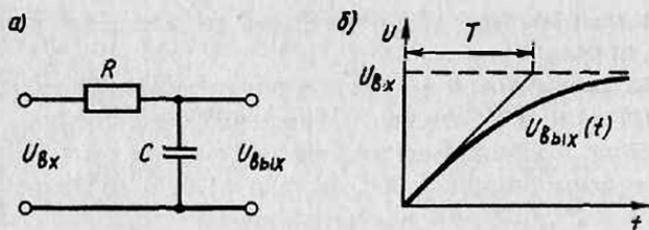


Рис. 11.9

**Датчики координат электрических приводов.** В замкнутых ЭП, как уже говорилось, для формирования требуемых статических и динамических характеристик применяются обратные связи по скорости, положению, току и напряжению, реализуемые с помощью соответствующих датчиков. Аналоговые датчики скорости и тока были рассмотрены в 10.4. Рассмотрим и некоторые другие датчики, применяемые в аналоговых схемах управления замкнутых ЭП.

**Датчики напряжения** для ЭП с ДПТ выполняются на основе потенциометра, включаемого на зажимы якоря  $M$  двигателя, как это показано на рис. 11.10, а. Уровень сигнала обратной связи по напряжению  $U_{0,н}$ , снимаемого с потенциометра  $RP$ , а значит, и коэффициент обратной связи по напряжению определяются положением движка потенциометра.

Для получения сигнала обратной связи по напряжению в ЭП с двигателями переменного тока используются трансформаторные схемы (см. рис. 11.10, б). Аналогичные схемы применяются в системе УВ – ДПТ, где трансформаторы напряжения подключаются к цепям переменного тока УВ.

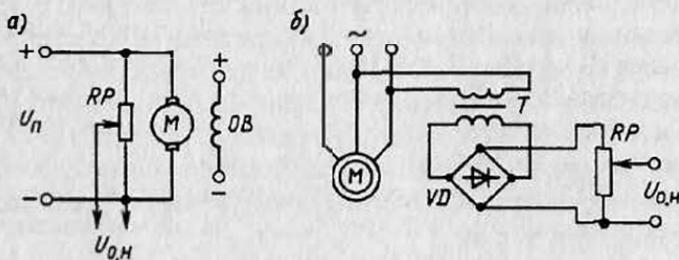


Рис. 11.10

В УБСР реализация цепей обратных связей по току и напряжению осуществляется с помощью ячеек ПН-1АИ и ПН-2АИ, называемых датчиками тока и напряжения. Они позволяют регулировать коэффициенты обратных связей и обеспечивают гальваническую развязку силовых цепей и цепей управления.

*Датчики положения* применяются для получения электрического сигнала, пропорционального положению исполнительного органа или вала двигателя. В таких датчиках используются сельсины, потенциометры и вращающиеся трансформаторы.

Сельсинные датчики положения с выходом на постоянном токе (см. рис. 11.8, а) соединяются с исполнительным органом или валом двигателя, в результате чего их выходное напряжение будет пропорционально положению. В ЭП применяются сельсины типов БД 160, БД 404, БД 501, ДИД 505, НЭД-101.

В следящем ЭП применяется сельсинное устройство, выполняющее функции задатчика, датчика положения и измерителя рассогласования (ошибки). Оно включает в себя два сельсина, обмотки роторов которых соединены между собой. При этом обмотка статора одного сельсина (здатчика) подсоединяется к источнику питания (см. рис. 11.8, а), а со статорной обмотки другого сельсина (датчика) снимается напряжение, значение и фаза которого определяются углом рассогласования между положением их роторов. Далее этот сигнал подается на фазочувствительный выпрямитель.

Потенциометрические датчики положения выполняются по схемам рис. 11.8, в... д. При соединении движка такого датчика с валом двигателя его выходное напряжение будет пропорционально положению вала.

Датчики положения на основе вращающихся трансформаторов являются электромеханическими устройствами. Как и в сельсинах, напряжение на их выходах определяется положением подвижной части.

**Устройства согласования** применяются для соединения в единую схему разнообразных элементов управления. В УБСР-АИ к таким устройствам относятся ячейка согласующего усилителя У1-АИ, позволяющая соединять элементы этой системы с другими устройствами, имеющими входные сигналы +24 В; ячейки гальванической развязки РГ-2АИ и РГ-3АИ, которые применяются для потенциального разделения электрических цепей с напряжением до 1000 В; ячейки фильтров Ф1-АИ и Ф2-АИ, обеспечивающие фильтрацию электрических сигналов в схеме управления.

В состав УБСР входят также блоки питания с выходным стабилизированным напряжением постоянного и переменного токов.

#### 11.4. ДИСКРЕТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В управлении технологическими процессами используются электронные вычислительные машины (ЭВМ) для сбора, обработки и контроля больших объемов информации о ходе этих процессов и оп-

тимизации режимов их работы. Комплексная автоматизация технологических процессов с использованием средств вычислительной техники, и в первую очередь микропроцессорного управления, позволяет существенно повысить производительность труда и качество выпускаемой продукции, а также повысить надежность работы оборудования и улучшить условия труда обслуживающего персонала.

Многие требования, предъявляемые к ЭП рабочих машин и механизмов при комплексной автоматизации их работы, позволяют выполнить цифровые схемы управления. Они обеспечивают высокую точность и быстродействие работы ЭП и характеризуются большой надежностью и малым энергопотреблением. Цифровые схемы управления ЭП естественным образом сочетаются с ЭВМ, управляющими технологическими процессами, составляя с ними единую автоматизированную систему управления (АСУ).

Во многих случаях целесообразным оказывается создание смешанных цифроаналоговых схем управления ЭП, сочетающих в себе лучшие свойства аналоговых и цифровых (дискретных) элементов и устройств.

Используемые в ЭП цифровые средства управления можно разделить на следующие группы: логические элементы и триггеры, реализующие простейшие логические операции; цифровые узлы (комплекс элементов), включающие в себя совокупность логических элементов и выполняющие более сложные функциональные преобразования сигналов; цифровые устройства (комплекс узлов), реализующие сложные функции управления ЭП; цифровые вычислительные машины – ЦВМ (комплекс цифровых устройств), являющиеся высшей формой интеграции всех функций по управлению ЭП.

Несмотря на определенную условность такая классификация оказывается удобной при анализе цифровых схем управления ЭП.

Набор дискретных (цифровых) элементов, узлов и устройств управления существенно шире и разнообразнее, чем аналоговых. Так, например, если в системе УБСР-АИ насчитывается около 15 видов функциональных устройств, то в УБСР-ДИ имеется более 30 таких устройств, т.е. в два раза больше. Рассмотрим основные дискретные элементы и устройства.

**Триггер** – один из наиболее распространенных элементов цифровых устройств управления, обладающий двумя устойчивыми состояниями и способный скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием внешнего управляющего сигнала. С использованием триггеров строятся различные логические и вычислительные узлы, а также генерирующие устройства и устройства памяти. Не останавливаясь на технической реализации триггеров, что является предметом изучения курса «Промышленная электроника», рассмотрим их функциональные характеристики.

Триггер состоит из двух логических элементов ИЛИ – НЕ (рис. 11.11, а) и работает следующим образом. При подаче входного сигнала  $X_1 = 1$  и отсутствии сигнала  $X_2$  ( $X_2 = 0$ ) выход верхнего элемента устанавливается в состояние  $\bar{Y} = 0$ , а нижнего (основного) – в состояние  $Y = 1$ . (Чертой над переменной обозначается ее инверсное состояние.) Это состояние схемы сохранится при снятии сигнала  $X_1$  ( $X_1 = 0$ ). При подаче теперь сигнала  $X_2 = 1$  триггер перейдет в другое устойчивое состояние, в котором  $\bar{Y} = 0$ , а  $Y = 1$ .

$R$  –  $S$ -триггер изображен на рис. 11.11, б и его работа соответствует работе так называемого статического асинхронного триггера. На вход  $S$ , получивший свое обозначение от английского слова Set – установка, подается входной сигнал  $X_1 = X_s = 1$ , после чего на прямом выходе триггера появляется (устанавливается) единичный сигнал  $Y = 1$ , а на инверсном выходе сигнал  $\bar{Y} = 0$ . При подаче на вход  $R$  (от английского слова Reset – сброс) единичного сигнала  $X_2 = X_r = 1$  сигнал по выходу  $Y$  переведется на нулевой уровень ( $Y = 0$ ), а по инверсному выходу – на единичный ( $\bar{Y} = 1$ ).

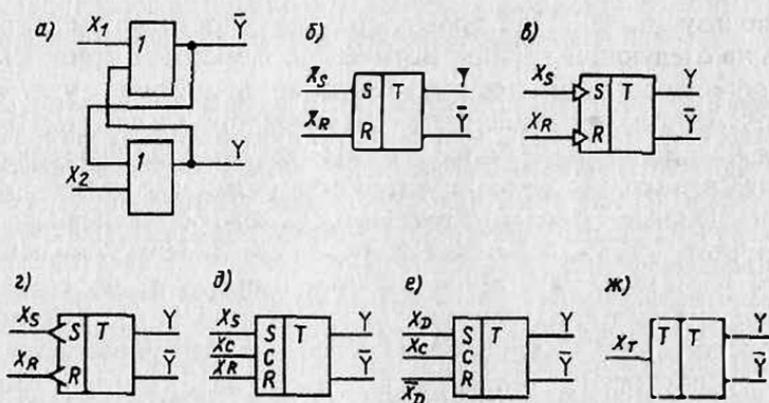


Рис. 11.11

Если на обоих входах сигналы отсутствуют ( $X_s = X_r = 0$ ), то триггер «запоминает» свое предыдущее состояние, что является его важным свойством. Сочетание сигналов  $X_s = X_r = 1$  запрещено, так как вызывает неопределенность состояния выходов триггера.

Определение «статический» характерно для случая, когда источники входных сигналов имеют непосредственную потенциальную связь со входами триггера и он реагирует на их уровень. Если входы триггера связаны с источниками входных сигналов не непосредственно, а через импульсные трансформаторы ( $RC$ -цепи и др.), то он реагирует только на перепады (изменения) входных напряжений и не реагирует на их уровень. Такое управление триггером получи-

ло название динамического. Если срабатывание триггера происходит при изменении входного сигнала с 0 на 1, то его входы называются прямыми и их условное обозначение показано на рис. 11.11, в. В противном случае, когда триггер срабатывает при изменении входного сигнала с 1 на 0, его входы называются инверсными и их условное изображение приведено на рис. 11.11, з.

Определение «асинхронный» соответствует возможности переключения триггера в произвольный момент времени, определяемый набором входных сигналов. Если необходимо, чтобы переключение триггера происходило в строго определенные моменты времени, то он дополняется еще одним входом  $C$ , на который подаются импульсы тактовой частоты  $X_c$ . Тогда при  $X_c = 0$  триггер будет сохранять предыдущее состояние, а появление сигнала  $X_c = 1$  даст разрешение на его переключение. Условное обозначение синхронного  $R-S$ -триггера со статическими входами показано на рис. 11.11, д.

*D-триггер* является разновидностью синхронного триггера. На его вход поступает лишь один сигнал  $X_D$ . Чтобы получить такой триггер из  $R-S$ -триггера, надо на его вход  $S$  подать сигнал  $X_D$ , а на вход  $R$  – инверсный сигнал. Условное изображение *D-триггера* приведено на рис. 11.11, е.

*T-триггер* имеет только счетный вход и управляется импульсным сигналом по этому входу, причем сигнал на выходе триггера изменяется на противоположный при поступлении очередного входного импульса. Такие триггеры нашли свое основное применение в счетчиках импульсов и делителях. Условное обозначение *T-триггера* приведено на рис. 11.11, ж.

*Двухступенчатый синхронный R-S-триггер* состоит из двух триггеров – входного и выходного, что существенно расширяет его функциональные возможности. При использовании внешних перекрестных связей на его основе можно получить так называемый *JK-триггер*, который может работать в режимах  $R-S$ -триггера, *D-триггера* и *T-триггера*, т. е. он является универсальным.

**Цифровые узлы и устройства** по своему функциональному назначению подразделяются на вычислительные, логические, устройства памяти, элементы согласования, временные устройства, цифроаналоговые преобразователи, устройства ввода – вывода данных и цифровые датчики координат. Рассмотрим состав этих групп и реализацию отдельных, наиболее употребляемых узлов и устройств.

*Вычислительные устройства* предназначены для выполнения различных арифметических операций. Вычислительные операции выполняются в цифровых узлах на основе двоичной системы счисления. В этой системе любое число привычной нам десятичной системы счисления можно представить комбинацией различных сте-

пней числа 2 (основания системы). Например, десятичное число 87 можно записать следующим образом:

$$(87)_{10} = 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = (1010111)_2,$$

т. е. можно представить комбинацией двух цифр – 0 и 1, показывающих наличие (1) или отсутствие (0) данного разряда (степени) числа 2. Представим цифры от 0 до 9 в двоичной форме:

Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Двоичная форма	0000	0001	0011	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001

Заметим, что основание системы исчисления показывает число цифр, используемых в ней для представления чисел. Так, в двоичной системе (основание 2) используются только две цифры – 0 и 1, а в десятичной – 10 (от 0 до 9).

В цифровых устройствах управления применяется также представление чисел в восьмеричной и шестнадцатеричной системах. В восьмеричной системе используются восемь цифр: от 0 до 7. Запись десятичного числа 87 в этой системе имеет следующий вид:

$$(87)_{10} = 1 \cdot 8^2 + 2 \cdot 8^1 + 7 \cdot 8^0 = (127)_8.$$

В шестнадцатеричной системе для представления чисел используются десять цифр: 0, 1, ..., 9 и шесть латинских букв – *A* (десять), *B* (одиннадцать), *C* (двенадцать), *D* (тринадцать), *E* (четырнадцать), *F* (пятнадцать). Например, шестнадцатеричное число *A3E,4* в десятичной системе имеет вид:

$$(A3E,4)_{16} = 10 \cdot 16^2 + 3 \cdot 16^1 + 14 \cdot 16^0 + 4 \cdot 16^{-1} = (2622,25)_{10}.$$

Латинские буквы этой системы можно представить в двоичной форме: *A* – 1010; *B* – 1011; *C* – 1100; *D* – 1101; *E* – 1110; *F* – 1111.

Для перевода восьмеричного (шестнадцатеричного) числа в двоичную форму надо заменить каждую цифру этого числа соответствующим трехразрядным (четырёхразрядным) двоичным числом, например:

$$(24,7)_8 = (10100,111)_2; (5D,6)_{16} = (1011101,11)_2.$$

Шестнадцатеричная и восьмеричная системы позволяют осуществлять более удобную запись информации в двоичной форме.

Правила выполнения арифметических действий над двоичными числами состоят в следующем:

*сложение*

$0 + 0 = 0$ ;  $0 + 1 = 1$ ;  $1 + 0 = 1$ ;  $1 + 1 = 0 + \text{единица переноса}$  в старший разряд;

*вычитание*

$0 - 0 = 0$ ;  $1 - 0 = 1$ ;  $1 - 1 = 0$ ;  $10 - 1 = 1$  при заеме единицы из старшего разряда;

*умножение*

$0 \times 0 = 0$ ;  $0 \times 1 = 0$ ;  $1 \times 0 = 0$ .

К вычислительным устройствам относятся счетчики, делители частоты, сумматоры и компараторы (устройства сравнения).

*Счетчик* – это цифровой узел, предназначенный для подсчета числа входных сигналов. Они подразделяются на суммирующие, вычитающие и реверсивные.

Суммирующий двоичный счетчик последовательного действия (рис. 11.12, а) состоит из четырех двухступенчатых *T*-триггеров. Включение и выключение первого триггера (выход  $Y_1$ ) производится задним фронтом импульсов входного сигнала  $X_{вх}$  (см. рис. 11.12, б). Включение и выключение остальных триггеров осуществляется задними фронтами импульсов прямого выхода предыдущего триггера.

Совокупность выходных сигналов триггеров  $Y_1 - Y_4$  соответствует числу поступивших на счетчик импульсов в двоичной форме представления, причем порядковый номер триггера определяет разряд двоичного числа. Так, если на вход счетчика поступило шесть импульсов, то  $Y_4 = 0$ ,  $Y_3 = 1$ ,  $Y_2 = 1$ ,  $Y_1 = 0$ , т.е. число импульсов  $m = (0110)_2 = (110)_2 = (6)_{10}$ . Емкость счетчика  $N$  определяется числом триггеров  $n$  по формуле  $N = 2^n - 1$ , т.е. для рассматриваемой схемы  $n = 4$  и в таком счетчике может быть записано число  $(N)_{10} = 2^4 - 1 = (15)_{10} = (1111)_2$ .

*Делитель частоты.* Схему, приведенную на рис. 11.12, а, можно использовать и для деления частоты. Действительно, как это следу-

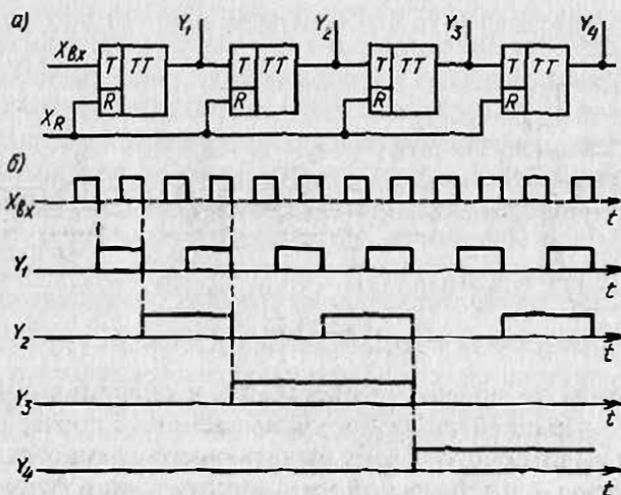


Рис. 11.12

ет из диаграммы рис. 11.12, б, число импульсов на выходах каждого последующего триггера за одно и то же время уменьшается вдвое, что означает уменьшение вдвое их частоты.

Установка счетчика в нулевое исходное состояние (очистка счетчика) осуществляется подачей единичного сигнала  $X_R$  на  $R$ -входы всех триггеров.

Реверсивные счетчики обеспечивают как суммирование, так и вычитание чисел, а вычитающие – только вычитание. Эти счетчики строятся по аналогичным схемам.

*Сумматор* – это цифровой узел, выполняющий операцию сложения двух чисел. Обычно сумматор представляет собой совокупность одноразрядных суммирующих схем, работающих в соответствии с таблицей двоичного сложения. Схема одноразрядного сумматора, приведенная на рис. 11.13, а, осуществляет сложение двух одноразрядных чисел  $a$  и  $b$  по двоичной системе:

$$a + b = \begin{cases} 0 + 0 = 0, & S = 0, & P = 0, \\ 0 + 1 = 1, & S = 1, & P = 0, \\ 1 + 0 = 1, & S = 1, & P = 0, \\ 1 + 1 = 10, & S = 0, & P = 1. \end{cases}$$

Здесь при сложении двух единиц результат представляется в двухразрядной форме:  $S = 0$  – в данном разряде и  $P = 1$  – перенос в следующий, более старший, разряд. Таким образом, для произвольного  $i$ -го разряда суммирование должно производиться с учетом трех слагаемых –  $a_i$ ,  $b_i$  и  $P_i$ , являющегося результатом переноса из предыдущего разряда. Для примера на рис. 11.13, б приведена схема четырехразрядного сумматора.

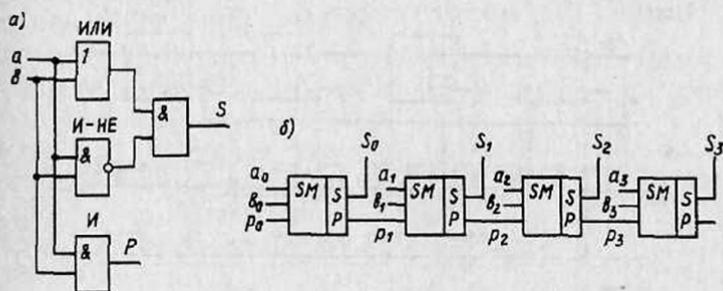


Рис. 11.13

Сумматоры позволяют осуществлять и операцию вычитания, заменяя ее операцией сложения уменьшаемого с поразрядным дополнением вычитаемого. Схему вычитающего сумматора см. в [17].

*Компаратор* – это цифровой узел, выполняющий функцию сравнения двух чисел  $A_n$  и  $B_n$ . В результате этого сравнения определяется

истинность одного из соотношений:  $A_n = B_n$ ;  $A_n > B_n$ ;  $A_n < B_n$ , каждое из которых фиксируется единичным сигналом на соответствующем выходе. Принцип действия одноразрядного компаратора при сравнении двух одноразрядных чисел  $a$  и  $b$  поясняет табл. 11.2.

Сравнение  $n$ -разрядных чисел производится поразрядно, после чего с помощью дополнительной логической схемы осуществляется анализ результатов сравнения, начиная со старшего разряда.

Таблица 11.2

$a$	$b$	$Y_1(a = b)$	$Y_2(a > b)$	$Y_3(a < b)$
1	1	1	0	0
1	0	0	1	0
0	1	0	0	1
0	0	1	0	0

**Логические цифровые узлы** предназначены для осуществления различных логических операций над дискретными электрическими сигналами. К ним относятся распределители импульсов, шифраторы, дешифраторы и мультиплексоры.

*Распределитель импульсов* представляет собой цифровой узел, который обеспечивает распределение одноканальной последовательности импульсов по нескольким выходам, при этом единичный сигнал  $Y_i$  на  $i$ -м выходе появляется при исчезновении сигнала  $Y_{i-1}$  на предыдущем ( $i - 1$ )-м выходе распределителя, а снимается сигнал  $Y_i$  входным (тактовым) импульсом. Пример реализации распределителя на четырех  $D$ -триггерах приведен на рис. 11.14, а.

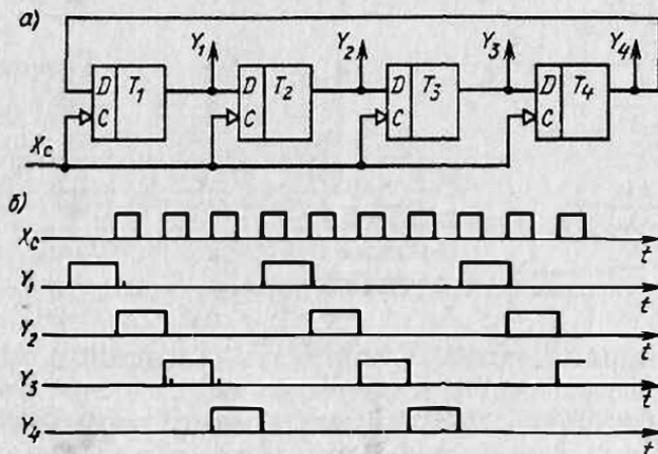


Рис. 11.14

Предположим, что в исходном положении на выходе первого триггера имеется единичный сигнал  $Y_1 = 1$ . Приход на вход  $C$  первого входного (тактового) импульса  $X_c$  (см. рис. 11.14, б) приведет к исчезновению сигнала с выхода первого триггера ( $Y_1 = 0$ ) и появлению сигнала на выходе второго ( $Y_2 = 1$ ). При поступлении следующего импульса сигнал  $Y_2$  станет равен нулю, а сигнал  $Y_3$  — единице и т. д. С выхода четвертого триггера сигнал по цепи обратной связи поступит на вход первого триггера и цикл повторится. Отметим, что частота распределения импульсов по каждому выходу распределителя  $Y_1 \dots Y_4$  определяется соотношением

$$f = f_T/n, \quad (11.4)$$

где  $n$  — число триггеров распределителя;  $f_T$  — частота тактовых импульсов.

*Дешифратор (декодер)* осуществляет такое преобразование сигнала на  $n$  входах, при котором на одном его выходе вырабатывается сигнал, равный единице, а на всех остальных сохраняются сигналы, равные нулю. Обратную операцию выполняет шифратор, преобразующий единичный сигнал на одном из входов в двоичное число на нескольких выходах.

*Мультиплексор* — это цифровой узел, обеспечивающий передачу сигналов с нескольких входных линий на одну выходную. Выбор входной линии производится с помощью управляющего импульсного сигнала (кода), подаваемого на управляющие входы мультиплексора. Мультиплексор выполняется посредством небольшого преобразования схемы дешифратора.

*Устройства памяти* предназначены для запоминания, хранения и выдачи информации. К ним относятся регистры, матрицы-накопители и запоминающие устройства.

*Регистр* предназначен для записи, запоминания и выдачи многоразрядного двоичного числа и выполнения над ним некоторых несложных логических операций.

На рис. 11.15 приведена схема регистра для хранения трехразрядного числа  $A$ . Основу схемы составляют три триггера и шесть логических элементов  $\&$ .

Записи предшествует подача на вход  $R$  сигнала  $X_R = 1$ , который устанавливает нулевые сигналы на выходах триггеров  $Y_0 = Y_1 = Y_2 = 0$ , т. е. «стирает» предыдущее число и подготавливает регистр к записи нового. Запись двоичного числа с разрядами  $a_0, a_1, a_2$  про-

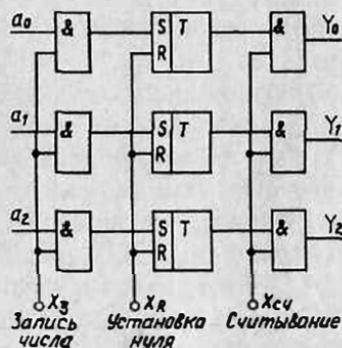


Рис. 11.15

изводится при поступлении сигнала  $X_3 = 1$ , который «открывает» входы триггеров для приема числовой информации. Записанное число запоминается и хранится в регистре и при  $X_3 = 0$ . Для считывания записанного числа подается сигнал  $X_{сч} = 1$ , который позволяет вывести на выходы  $Y_0, Y_1, Y_2$  записанные разряды числа  $A$ .

Рассмотренный порядок работы схемы, показанной на рис. 11.15, соответствует вводу числа в регистр в параллельном коде, когда информация записывается одновременно по всем разрядам.

Кроме параллельного, при записи чисел в регистр применяется и последовательный код, который предусматривает ввод числа по одному входу за  $n$  тактов, соответствующих  $n$  разрядам записываемого числа.

Введение дополнительных связей и логических элементов в регистрах позволяет выполнять такие логические операции, как инвертирование кода, сдвиг числа вправо или влево на требуемое число разрядов, передача чисел в другой разряд и др.

Отметим, что объем информации, хранимой в устройствах памяти, измеряется специальными единицами – битами и байтами. Бит – это один разряд двоичного числа, принимающий значение 0 или 1. Группа битов (разрядов) образует слово, которое может состоять из 4, 8, 12 и 16 бит. Слово длиной в 8 бит получило название байта.

*Матрица-накопитель* представляет собой узел памяти с более высоким объемом запоминаемой информации по сравнению с регистром. Основу матрицы составляют триггеры, способные запомнить 1 бит информации (одноразрядное двоичное число). Многоразрядная матрица состоит из одноразрядных матриц, соединенных параллельно. Ввод и вывод информации осуществляется через внутренние шины данных (ШД), соединяющие все ячейки матрицы, при подаче соответствующих сигналов на запись или считывание. Эти сигналы подаются на ячейки по шинам управления (ШУ) от специального коммутирующего устройства.

Разновидностью матрицы-накопителя более высокого функционального уровня является программируемая логическая матрица (ПЛМ). Ее назначение состоит в формировании требуемой логической функции управления ЭП. На вход ПЛМ через соответствующие блоки согласования подается информация от внешних устройств управления, защиты и блокировок ЭП – кнопок управления, реле, конечных выключателей и др. В соответствии с требуемой программой, реализуемой схемой соединения логических и диодных элементов, ПЛМ преобразует получаемую информацию в логический сигнал управления, подаваемый через блоки согласо-

вания на исполнительные элементы ЭП. ПЛМ позволяет реализовывать бесконтактные разомкнутые схемы управления ЭП, рассмотренные в гл. 10.

*Запоминающее устройство* (ЗУ) предназначено для хранения больших объемов информации. ЗУ, обеспечивающие многократные запись и считывание информации, получили название оперативных запоминающих устройств (ОЗУ). Особенность ОЗУ состоит в том, что оно хранит информацию только при наличии питания, а при его исчезновении информация теряется.

ЗУ, предназначенные для постоянного хранения записанной информации, получили название постоянных запоминающих устройств (ПЗУ). Эти устройства способны сохранять записанную в них информацию и при потере питания. Для ПЗУ характерны большой объем хранимой информации, более простые по сравнению с ОЗУ схемы и меньшее энергопотребление.

К **временным устройствам** относятся генератор эталонной частоты, служащий для выработки тактовых импульсов частотой 100... 500 кГц (I исполнение) или 1... 5 МГц (II исполнение), и мультивибратор универсальный с частотой выходного сигнала до 200 кГц.

**Цифроаналоговые устройства** включают в себя: преобразователь код – напряжение (ПКН), преобразующий двоичный или двоично-десятичный код в напряжение постоянного тока; преобразователи частота – напряжение (ПЧН) и напряжение – частота (ПНЧ), осуществляющие преобразование частоты следования импульсов в напряжение постоянного тока, а также обратное преобразование.

**Устройства согласования** обеспечивают согласование сигналов узлов и устройств УБСР-ДИ с релейно-контакторной аппаратурой управления электропривода, усиление выходных сигналов логических узлов и гальваническую (потенциальную) развязку электрических цепей.

Кроме того, в состав УБСР-ДИ входят вспомогательные узлы ввода-вывода информации и блоки питания.

На базе рассмотренных цифровых узлов в рамках УБСР-ДИ разработаны также типовые блоки управления, позволяющие выполнять сложные арифметические и логические операции. К ним относятся блоки для обработки цифровой информации (формирователь чисел, дискриминатор чисел, арифметическое устройство) и частотных сигналов (генератор частотных сигналов, цифровой интегратор, управляемый делитель частоты), блоки преобразования кода числа в частоту и частоты в код числа, ввода и вывода информации (регистры памяти входной и выходной, формирователь сигналов импульсных и кодовых датчиков положения, уси-

лители выходные), а также блоки связи с аналоговыми элементами схем управления ЭП.

Узлы и блоки УБСР-ДИ реализуются на основе цифровых интегральных микросхем серий К 155 и К 172 и аналоговых интегральных схем серий К 124, К 140, К 153 и К 190. В устройствах связи и согласования с внешними цепями используются оптронные ключи и герконовые реле. В УБСР-ДИ используется унифицированный электрический сигнал  $0 \dots 10$  В,  $\pm 5$  мА, позволяющий согласовывать ее работу с УБСР-АИ. Для логических элементов, выполненных по структуре «металл – оксид – полупроводник» (МОП), логический нуль соответствует напряжению от 0 до  $-1$  В, а логическая единица – напряжению от  $-9,5$  до  $-20$  В для элементов типа «транзисторно-транзисторная логика» (ТТЛ) эти уровни соответственно составляют  $0 \dots 0,4$  В и  $2,4 \dots 5$  В. Элементы УБСР-ДИ размещаются на стеклотекстолитовых платах (модулях) размером  $100 \times 160$  мм с печатным монтажом, ввод и вывод сигналов осуществляется с помощью разъемов. Модули набираются в блоки, а блоки в свою очередь соединяются в кассеты единой блочной унифицированной конструкции (БУК).

### 11.5. ДАТЧИКИ СКОРОСТИ И ПОЛОЖЕНИЯ, ПРИМЕНЯЮЩИЕСЯ В ЗАМКНУТЫХ СХЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Для получения информации о скорости и положении вала двигателя в замкнутых ЭП применяются аналоговые и дискретные датчики скорости и положения.

**Датчики скорости (тахогенераторы)** предназначены для измерения скорости вращения вала двигателя или исполнительного органа рабочей машины. Они представляют собой специализированные электрические машины небольшой мощности, выходное напряжение которых пропорционально скорости вращения их якоря (ротора), т. е.  $U_{\text{вых}} = \gamma \omega$ , где  $\gamma$  – коэффициент пропорциональности. Основное требование к тахогенераторам заключается в максимальной приближении зависимости  $U_{\text{вых}}(\omega)$  к линейной, что определяет точность их работы.

По принципу своего действия и устройству тахогенераторы бывают постоянного и переменного тока.

*Тахогенераторы постоянного тока* представляют собой небольшие генераторы постоянного тока с возбуждением от независимого источника (рис. 11.16, а) или от постоянного магнита (см. рис. 10.7, б).

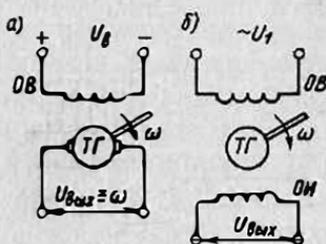


Рис. 11.16

*Тахогенераторы переменного тока* в основном применяются асинхронного типа и по своему устройству мало отличаются от однофазных асинхронных двигателей. Они имеют две обмотки (см. рис. 11.16, б), одна из которых *ОВ* подключается к питающей сети и служит для возбуждения тахогенератора, а другая *ОИ* является измерительной. Напряжение на зажимах этой обмотки  $U_{\text{вх}}$  пропорционально скорости вращения тахогенератора  $\omega$ .

*Синхронные тахогенераторы* представляют собой однофазный синхронный генератор малой мощности с ротором в виде многополюсного постоянного магнита. При вращении ротора создаваемое им магнитное поле пересекает витки обмотки статора и наводит в ней ЭДС, пропорциональную скорости вращения, поэтому выходное напряжение на зажимах обмотки статора оказывается пропорциональным скорости ротора.

Особенностью синхронных тахогенераторов является зависимость частоты их выходного напряжения от скорости ротора.

Кроме аналоговых датчиков скорости в замкнутых схемах все шире применяются цифровые датчики, сигналы которых могут непосредственно поступать в цифровые схемы управления. Применение таких датчиков позволяет повысить точность регулирования скорости исполнительных органов рабочих машин и механизмов.

*Импульсный индукционный датчик скорости* включает в себя зубчатый диск 1 (рис. 11.17), соединенный с валом двигателя или рабочей машины. Напротив зубцов этого диска располагается индуктор 2, представляющий собой постоянный магнит с расположенной на нем измерительной обмоткой 3, подключенной к источнику питания  $U_n$ . Напряжение, снимаемое с обмотки, подается через конденсатор  $C$  на вход усилителя  $Y$ , выполняющего одновременно роль формирователя импульсов. При вращении диска изменяется зазор между его зубцами и полюсами индуктора 2. Вследствие этого резко изменяются магнитное сопротивление воздушного зазора и магнитный поток, проходящий через зубцы диска 1 и индуктор. Изменяющийся магнитный поток индуцирует в обмотке 3 ЭДС, частота которой  $f = \omega N / (2\pi)$ , где  $N$  – число зубцов диска;  $\omega$  – скорость диска (вала двигателя).

Созданное этой ЭДС напряжение переменного тока  $U_{\text{вх}}$  через конденсатор  $C$  подается на вход усилителя, который, усиливая этот сигнал, формирует из него последовательность выходных прямоугольных импульсов, частота которых пропорциональна измеряемой скорости. Далее эти импульсы

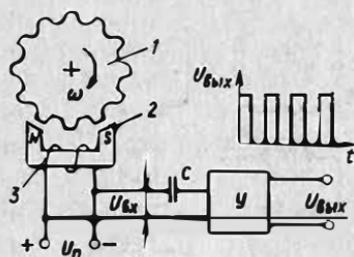


Рис. 11.17

при помощи цифрового блока «частота – код», имеющегося, например, в УБСР-ДИ, преобразуются в двоичное число посредством их подсчета за определенный интервал времени с запоминанием полученного числа на время последующего интервала. При необходимости этот переменный по частоте сигнал можно преобразовать и в напряжение постоянного тока (например, с помощью интегрирующего операционного усилителя) для использования в аналоговых схемах управления ЭП.

**Датчики положения** применяются в замкнутых схемах управления ЭП и выполняются аналоговыми или цифровыми.

**Вращающиеся (поворотные) трансформаторы**, являющиеся аналоговыми датчиками положения (угла поворота) вала двигателя или рабочей машины, представляют собой индукционную электрическую машину малой мощности. Их работу рассмотрим на примере наиболее распространенного синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ). Этот трансформатор (рис. 11.18, а) имеет четыре обмотки, две из которых (возбуждения *ОВ* и компенсационная *ОК*) расположены на статоре и две (измерительные *ОИ1* и *ОИ2*), называемые вторичными, – на роторе. Ротор соединяется с валом двигателя или рабочей машины, положение которых должно измеряться.

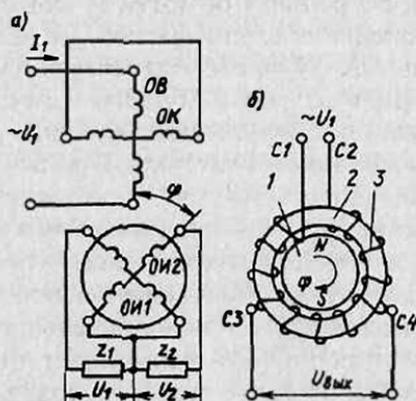


Рис. 11.18

К обмотке возбуждения *ОВ* подводится однофазное напряжение переменного тока  $U_1$ . Протекающий под его действием ток создает в воздушном зазоре СКВТ магнитный поток, который наводит во вторичных (роторных) обмотках ЭДС. Значение этой ЭДС в обмотке *ОИ1* (синусной) пропорционально синусу, а в обмотке *ОИ2* (косинусной) – косинусу угла  $\varphi$  поворота ротора относительно статора. Напряжения  $U_1 = U_{\max} \sin \varphi$  и  $U_2 = U_{\max} \cos \varphi$  на нагрузках  $z_1$  и  $z_2$  являются информацией об угле поворота  $\varphi$  вала двигателя или рабочей машины.

Компенсационная обмотка *OK*, которая обычно закорачивается, служит для компенсации вредного действия магнитного поля тока обмоток ротора, обеспечивая тем самым снижение погрешности вращающихся трансформаторов.

В замкнутых схемах ЭП применяются также линейные вращающиеся трансформаторы, у которых выходное напряжение обмотки ротора прямо пропорционально углу  $\varphi$ .

*Сельсин*, также широко применяющийся в замкнутых схемах управления ЭП в качестве аналогового датчика положения, представляет собой электрическую машину малой мощности, которая обеспечивает преобразование угла поворота вала в электрический сигнал. Применение сельсина в качестве задающего устройства см. в разд. 11.3, а в качестве датчика положения и измерителя рассогласования следящего ЭП – в разд. 11.10.

*Магнесин* (см. рис. 11.18, б) является бесконтактным электромеханическим датчиком угла поворота, имеет более простое по сравнению с сельсином и вращающимся трансформатором устройство, меньшие массу и габаритные размеры и высокую точность измерения (менее  $2,5^\circ$ ).

Магнесин состоит из тороидального сердечника 2 без пазов, на котором намотана спиральная обмотка 3. Обмотка имеет зажимы *C1*, *C2* для подключения ее к однофазной питающей сети переменного тока и выводы *C3*, *C4*, расположенные под углом  $120^\circ$  относительно друг друга, для снятия выходного напряжения. Ротор магнесина представляет собой постоянный магнит 1 цилиндрической формы, соединяемый с валом двигателя. При подаче на зажимы *C1*, *C2* напряжения питания  $U_1$  на выводах обмотки *C3*, *C4* появится выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ , пропорциональное углу поворота ротора магнесина  $\varphi$ , которое поступит в схему управления ЭП.

*Индуктосин* используется для измерения линейных перемещений механических элементов ЭП или исполнительных органов рабочих машин. По своему устройству он напоминает линейный асинхронный двигатель и имеет плоские статор и подвижный ротор. Первичная обмотка, расположенная на статоре, подключается к однофазной сети переменного тока, при этом на вторичной обмотке при перемещении ротора будет наводиться ЭДС, зависящая от его положения. Точность индуктосинов может достигать несколько микрометров.

*Цифровой фотоэлектрический датчик положения* в качестве первичного элемента включает в себя кодирующий диск (рис. 11.19, а), соединяемый с валом двигателя или рабочей машины. Диск состоит из нескольких концентрических колец (дорожек), каждое из которых имеет сегментообразные прозрачные и непрозрачные участки. Кольцо с минимальным радиусом (т.е. расположенное ближе

всего к оси диска) имеет два таких участка и относится к старшему разряду выходного числа. В каждом последующем кольце число этих участков удваивается, что соответствует в двоичном представлении чисел переходу к следующему разряду. Диск, показанный на рисунке, состоит из трех колец, что позволяет сформировать с его помощью трехразрядное двоичное число.

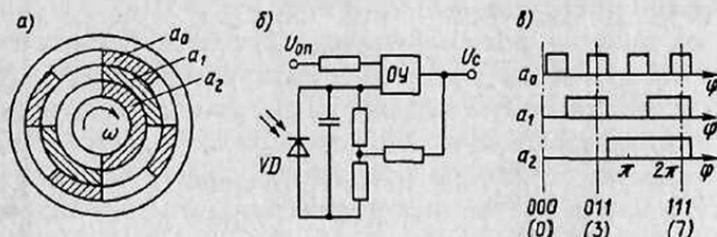


Рис. 11.19

Получение сигнала производится фотоэлектрическим способом. Для этого с одной стороны диска устанавливаются по числу его колец источники света – светодиоды, а с другой – приемники света – фотодиоды. Когда между ними находится прозрачный участок диска, светодиод освещает фотодиод, электрическое сопротивление последнего резко изменяется, что и является входным воздействием для последующей работы датчика положения.

Схема одного канала датчика положения, соответствующего одному разряду, показана на рис. 11.19, б. Фотодиод  $VD$  включен на вход операционного усилителя  $OY$ , работающего в режиме релейного элемента. В исходном положении усилитель «закрывается» отрицательным опорным напряжением  $U_{on}$ . При освещении фотодиода  $VD$  светодиодом усилитель «открывается» и на его выходе появляется электрический сигнал, соответствующий единице двоичного числа. Число усилителей определяет разрядность датчика положения.

Любому положению кодирующего диска в пределах  $360^\circ$  (одного оборота) соответствует определенное сочетание нулей и единиц на выходах усилителей, т. е. определенное числовое выражение угла. Из диаграммы работы рассматриваемого трехразрядного датчика (см. рис. 11.19, в) видно, что при повороте диска на  $360^\circ$  имеет место восемь комбинаций сигналов с выходов усилителей от 000 до 111. Это соответствует изменению числа в десятичной системе от 0 до 7.

Из приведенной диаграммы также видно, что сигнал с выхода датчика положения изменяется через каждые  $45^\circ$ , что определяет его дискретность (точность). В общем случае дискретность цифрового датчика положения определяется выражением  $\Delta\varphi = 360^\circ/2^n$ , где  $n$  – число его разрядов.

Для повышения точности цифровых датчиков положения используется несколько кодирующих дисков, соединяемых с валом двигателя через редуктор.

Вместо фотоэлектрических первичных элементов в датчиках положения могут применяться индуктивные датчики с индуктосинами, позволяющие получать выходные сигналы более высокой точности. Разрешающая способность таких датчиков, характеризующая их точность, определяется выражением  $\Delta\varphi = 360^\circ / (p \cdot 2^n)$ , где  $p$  — число пар полюсов индуктосина. Поскольку это число может составлять несколько сотен, то точность может быть обеспечена в несколько единиц (или десятков единиц) угловых секунд.

В цифровых системах управления ЭП нашли применение импульсные датчики типов ПДФ-3 и ДИФ-5. Первый из них имеет выходной сигнал в виде двух серий импульсов, сдвинутых друг относительно друга на четверть периода. Число импульсов за один оборот вала двигателя составляет 600. Датчики типа ДИФ-5 различной модификации позволяют получать за один оборот вала датчика от 45 до 1800 импульсов,

В последнее время в замкнутых схемах ЭП применяются комплексные датчики скорости и положения вала двигателя. К ним относятся датчики типов ПДФ-8 и ПДФ-9, включающие в себя датчик скорости (бесконтактный тахогенератор постоянного тока) и фотоимпульсный датчик положения ротора, выдающий от 125 до 2500 импульсов за один оборот вала. Такие датчики применяются, в частности, в ЭП типов ЭПБ-1 и ЭПБ-2 с вентильными двигателями.

## 11.6. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Микропроцессором (МП) называется программно-управляемое устройство, осуществляющее процесс обработки цифровой информации и управления этим процессом и построенное на одной или нескольких больших интегральных микросхемах (БИС). Остановимся более подробно на основных признаках МП, сформулированных в этом определении.

Микропроцессор выполняется на основе одной или нескольких БИС, каждая из которых состоит из нескольких десятков тысяч простых элементов — транзисторов, диодов, резисторов и конденсаторов. Площадь БИС не превосходит нескольких десятков квадратных миллиметров. Такое исполнение МП определяет его малое энергопотребление, высокую надежность в работе, небольшие массу и габаритные размеры, а при массовом выпуске — невысокую стоимость.

Микропроцессор является элементом управления с гибким алгоритмом работы, который определяется закладываемой в его память программой и который может быть изменен. Для лучшего понимания этого очень важного достоинства МП вспомним работу логических узлов схем управления ЭП (см. разд. 10.6). Для реализации заданных логических операций в этих схемах применяется определенный набор логических элементов, соответствующим образом между собой соединенных. При необходимости изменения алгоритма функционирования таких схем необходима их переработка (перемонтаж), связанная с заменой одних элементов на другие или добавлением новых и изменением схемы их соединения, т. е., другими словами, требуется изменение аппаратной (элементной) части схемы управления.

При использовании МП изменение алгоритма функционирования схемы достигается за счет замены одной программы на другую, что более удобно, просто и позволяет существенно уменьшить время на перенастройку схемы управления.

Все это определило бурный рост использования выполненных на основе МП средств управления, начиная со сложных производственных комплексов и кончая детскими играми. МП применяются для автоматизации работы энергетических систем и отдельных энергоблоков, при управлении автомобилями, в бытовой технике, для автоматизации научных исследований и проектных работ и во многих других случаях. О быстром расширении областей применения МП свидетельствует и тот факт, что выпуск БИС для МП в развитых странах удваивается примерно каждые два года.

Постоянно растущие требования к диапазону регулирования координат ЭП, его функциональным возможностям, надежности и стоимости, а также новые достижения электроники и микроэлектроники определили появление нового вида микропроцессорной техники – микроконтроллеров для управления двигателями (от англ. Motor control). Эти ориентированные на применение в ЭП средства, обладая производительностью в несколько десятков миллионов операций в секунду, позволяют реализовывать как высокоэффективные встроенные системы цифрового управления, так и схемы автоматизации технологического оборудования.

**В структурную схему микропроцессора** (рис. 11.20, а) входят арифметико-логическое устройство АЛУ, устройство управления УУ и регистровое запоминающее устройство РЗУ. Эти три основные части МП соединены тремя линиями связи – шинами данных ШД, шиной адресов ША и шиной управления ШУ.

*Арифметико-логическое устройство* предназначено для выполнения арифметических и логических операций над данными, представленными в виде двоичных чисел. Данные, с которыми произво-

дятся эти операции, называются операндами. Обычно в операции участвуют два операнда, один из которых находится в специальном регистре – аккумуляторе *A*, а другой – в регистрах *РЗУ* (или памяти МП). Иногда *АЛУ* называют операционной частью МП.

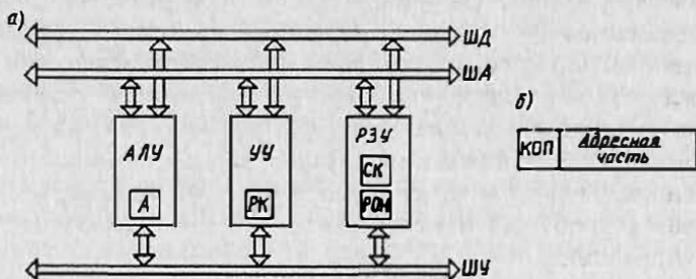


Рис. 11.20

*Регистровое запоминающее устройство* содержит несколько регистров общего назначения (*РОН*), а также регистры специального назначения, в частности счетчик команд *СК*. Иногда *РЗУ* называют внутренней памятью МП.

*Управляющее устройство* предназначено для выработки сигналов управления, обеспечивающих работу блоков МП. В состав *УУ* входит регистр команд *РК*, в котором фиксируется выполняемая в данный момент команда.

Как уже отмечалось, работа МП обеспечивается программой, записанной в его памяти.

**Программа.** Последовательность команд, обеспечивающих реализацию заданного алгоритма обработки информации, образует программу. Важной особенностью работы МП является то, что команды программы в нем выполняются в пошаговом режиме строго в записанной последовательности.

Каждая команда программы содержит информацию о том, что нужно делать, с какими операндами и по какому адресу поместить результат операции. Для этого команда имеет структуру, приведенную на рис. 11.20, б. Первая часть ее содержит код операции *КОП*, т.е. информацию о характере операции над операндами (например, сложение, логическое сравнение и др.). Вторая часть команды – адресная – содержит адреса расположения операндов, с которыми производится данная операция, и адрес регистра или ячейки памяти, куда должен быть помещен результат.

Команды, адреса и операнды МП выражаются двоичными многоразрядными числами, представляемыми, как и во всех цифровых устройствах, комбинацией двух уровней напряжения – высокого и низкого. Первые МП оперировали четырехразрядными числами, а

в современных МП используются восьми- и шестнадцатирядные числа. Использование в МП многорядных двоичных чисел позволяет повысить их быстродействие и точность работы.

Программа (совокупность команд) МП может быть записана несколькими способами. Первый из них предусматривает запись команд непосредственно в виде двоичных чисел, т. е. в виде так называемого машинного кода, понятного для данного МП. Такой способ составления программ в большинстве случаев оказывается малодобрым и требует больших затрат времени, особенно при создании больших программ.

Более удобным является использование языков программирования. Языки низкого уровня типа АССЕМБЛЕР как средство общения с МП включают в себя несколько десятков типовых команд, представленных в условных мнемокодах. Например, язык этого типа для отечественного восьмирядного МП типа К 580 включает в себя около 80 типовых команд – арифметических, логических, пересылки данных, передачи управления и ряд других. Отметим, что тот или иной язык используется только на этапе программирования, а оперирует МП при своей работе с двоичными числами.

Большие возможности и удобства пользователю микропроцессорными схемами управления предоставляют языки программирования высокого уровня: ФОРТРАН, ПАСКАЛЬ, ПЛИМ, БЕЙСИК, СИ, АДА и их разновидности (диалекты). Составленные на этих языках программы далее транслируются (переводятся) с помощью специальных программ, получивших название кросс-программ, в систему машинных кодов, понятных для МП.

Представленный на рис. 11.20, а МП не может быть непосредственно использован для управления ЭП (или каким-либо другим объектом). Для выполнения функции управления схема МП должна быть дополнена целым рядом блоков, к числу которых относятся устройства памяти, устройства согласования с другими блоками ЭП, устройства ввода-вывода, генератор тактовых импульсов и ряд других.

**Микропроцессорная система.** Совокупность МП и перечисленных выше устройств образует микропроцессорную систему (МПС), структурная схема которой приведена на рис. 11.21.

В состав этой МПС наряду с МП входят устройства памяти оперативной ОЗУ и постоянной ПЗУ, интерфейсное устройство ИУ, устройства сопряжения УС с внешними объектами; внешние запоминающие устройства ВЗУ, устройства ввода-вывода информации УВВ, общая шина ОШ, включающая в себя ШД, ШУ и ША. Кроме того, на схеме СЧЭП обозначена силовая часть ЭП (преобразователь – двигатель – механическая передача). Рассмотрим кратко назначение каждого из устройств МПС.

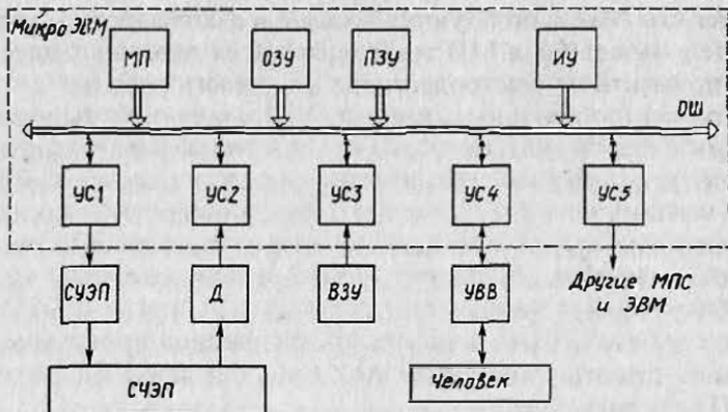


Рис. 11.21

Устройства памяти *ОЗУ* и *ПЗУ* служат для размещения подлежащих обработке данных и программы, в соответствии с которой эта обработка должна вестись, а также результатов обработки. Для расширения возможностей МПС, кроме *ОЗУ* и *ПЗУ*, могут использоваться *ВЗУ*, к числу которых относятся накопители информации на гибких магнитных дисках и магнитной ленте, а также кассетные накопители.

Устройства ввода-вывода информации (*УВВ*) предназначены для обеспечения взаимодействия МПС и человека в удобной для него форме. К устройствам ввода-вывода относятся клавиатура пульта управления, печатающая машинка (принтер), графопостроители, устройства визуального представления информации (дисплей) и др.

Устройства сопряжения (*УС*) обеспечивают связь МПС с различными внешними (периферийными) устройствами. Они могут иметь самые разнообразные схемные и элементные реализации. В частности, для связи МПС с датчиками координат ЭП (*Д*) и блоками схемы управления ЭП (*СЧЭП*) широко используются аналого-цифровые (*АЦП*) и цифроаналоговые (*ЦАП*) преобразователи электрических сигналов, обозначенные на схеме *УС1* и *УС2*.

Устройства сопряжения *УС3* и *УС4*, предназначенные для связи МПС с *ВЗУ* и *УВВ*, представляют собой в простейшем случае буферные (промежуточные) регистры памяти для хранения данных, передаваемых с общей шины *ОШ* на внешние устройства или обратно. Устройства сопряжения, получившие название контроллеров (микроконтроллеров), выполняют более сложные функции, и их работа может программироваться.

Устройства сопряжения *УС5*, выполняющие согласование работы данной МПС с другими МПС и ЭВМ, называются адаптерами.

*Интерфейсное устройство (ИУ)* – это совокупность электронных схем, шин и алгоритмов (программ), обеспечивающая управление передачей информации между МП, памятью и внешними устройствами (*УВВ, ВЗУ, Д*). Другими словами, интерфейсное устройство обеспечивает требуемое взаимодействие МПС с указанными внешними устройствами при изменении режима ее работы. Типичным примером является переход от выполнения одной программы к выполнению другой при поступлении от какого-либо внешнего устройства сигнала управления. Такой переход получил название прерывания. После завершения прерывающей программы ИУ обеспечивает возврат МПС к работе по прерванной программе. Примерами ИУ являются таймер, блок прямого доступа к памяти, блок организации прерываний.

Отметим, что совокупность МП, памяти и интерфейса, который включает в себя ИУ, УС и ОЩ, получила название микроЭВМ.

По назначению МПС и микроЭВМ подразделяются на универсальные и специализированные.

К универсальным относятся МПС и микроЭВМ, способные как обеспечивать управление различными объектами (в том числе и ЭП), технологическими процессами, промышленными предприятиями, так и выполнять различные вычислительные операции. Для выполнения этих функций МПС имеет широкий набор внешних (периферийных) устройств, показанных на рис. 11.21. Обычно при конкретном применении часть этих устройств может быть не задействована, т.е. универсальные МПС и микроЭВМ обладают элементной избыточностью.

Специализированными называются МПС, которые уже на стадии своего создания ориентированы на конкретное применение – схемы управления ЭП станка или робота, бытовые приборы или детские игры, измерительные системы и др. В этом случае МПС содержат только те устройства и имеют такое программное обеспечение, которые обеспечивают выполнение конкретных, заранее определенных функций.

Широко распространенным примером специализированной МПС является программируемый контроллер (ПК).

Для лучшего понимания выполняемых ПК функций и особенностей его структуры обратимся к схемам (см. рис. 10.23), реализующим различные логические операции при управлении ЭП – разрешение включения одного контактора при включенном другом, разрешение включения двигателя при нажатии кнопки управления и отсутствии запрещающего сигнала защиты и др. Подобные схемы получили название жесткой (или монтажной) логики, так как осуществление заданных логических операций обеспечивается определенным набором элементов и связями между ними. При реализа-

ции сложных систем управления (20...30 элементов и более) схемы с жесткой логикой приобретают большую массу и габаритные размеры, возрастает их энергопотребление, усложняются наладка и диагностика их работы и соответственно ремонт. Самый же существенный недостаток таких схем, как уже отмечалось, состоит в сложности их переделки (перемонтажа) при введении новых функций или их частичном изменении.

Альтернативным (технически и экономически более целесообразным) решением при создании сложных схем управления ЭП является применение программируемых контроллеров как разновидности МПС. Применение ПК позволяет избежать всех тех недостатков, которые характерны для схем с жесткой логикой, и в первую очередь отсутствия гибкости при реализации сложных законов управления. Программируемый контроллер – это специализированная МПС, предназначенная для обработки логических входных сигналов, их преобразования и выработки управляющих воздействий на ЭП и работающая по заранее заданной программе. Процесс обработки поступающей информации и выработки управляющих воздействий осуществляется в ПК по программе и происходит в реальном масштабе времени.

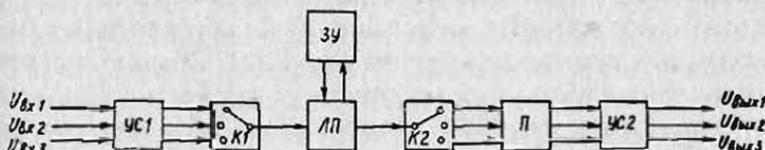


Рис. 11.22

В состав ПК (рис. 11.22) входят запоминающее устройство ЗУ, в котором содержится программа его работы; логический процессор ЛП (АЛУ на схеме рис. 11.20), осуществляющий логические операции над последовательно вводимыми в него сигналами; коммутаторы входных  $K1$  и выходных  $K2$  сигналов; устройства сопряжения ПК с входными УС1 и выходными УС2 сигналами, а также память П, в которую поступают результаты выполнения логических операций.

Входные сигналы  $u_{вх1}, u_{вх2}, \dots, u_{вх3}$ , содержащие информацию о ходе технологического процесса, режимах работы отдельных частей ЭП, состоянии защиты, поступают на вход устройства сопряжения УС1, которое обеспечивает их гальваническую развязку и формирование из них сигналов, соответствующих по значению и виду используемым в данном ПК.

Сформированные таким образом сигналы поступают на вход коммутатора  $K1$ , который последовательно подает на ЛП тот из

них, адрес которого содержится в очередной команде, поступающей из ЗУ.

После выполненных ЛП преобразований, которые также определяются заложеной в ЗУ программой, сигналы через коммутатор К2 поступают в регистр памяти П и далее через УС2 на выход ПК.

Заметим, что последовательный принцип выполнения операций увеличивает время обработки информации, но так как время выполнения одной отдельной операции составляет всего лишь несколько микросекунд, быстрдействие ПК в большинстве случаев оказывается вполне достаточным.

В качестве входных допускаются сигналы напряжением от 5 до 250 В постоянного или переменного тока, общее число которых может достигать тысячи и более. Выходные устройства сопряжения УС2 обычно строятся на основе оптронных тиристоров, обеспечивающих гальваническую развязку выходных цепей и позволяющих управлять достаточно мощными исполнительными устройствами – реле, контакторами, катушками электромагнитов и др.

В теории цифровых систем управления показывается, что льюбые логические преобразования могут быть выполнены с помощью простейших логических операций И, ИЛИ, НЕ. Это положение определяет простоту программного обеспечения работы ПК, доступного в том числе персоналу, не имеющему специальных знаний в области программирования МПС. Типовыми командами ПК являются команды загрузки, логические, присвоения, управления циклом и специальные. Система команд имеет соответствующее мнемоническое обозначение.

## 11.7. 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 системы (рис. 11.23, а) составляет разомкнутая схема П – Д. На валу ДПТНВ находится датчик скорости – тахогенератор ТГ, выходное напряжение которого  $U_{ТГ} = \gamma\omega$  пропорционально скорости ДПТ и является сигналом обратной связи. Коэффициент пропорциональности  $\gamma$  называется коэффициентом обратной связи по скорости и может регулироваться за счет изменения тока возбуждения тахогенератора  $I_{ТГ}$ .

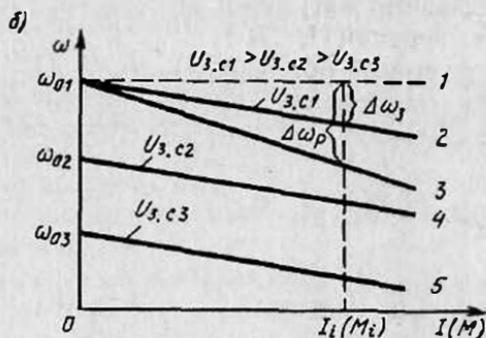
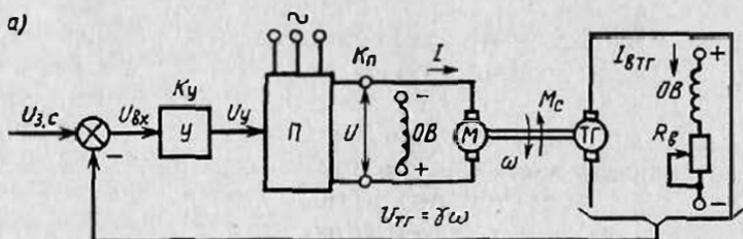


Рис. 11.23

Сигнал обратной связи  $U_{ТГ} = \gamma\omega = U_{оc}$  сравнивается с задающим сигналом скорости  $U_{3,c}$ , 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  $U_{у}$  на вход преобразователя П.

Для получения характеристик ДПТ в замкнутой системе воспользуемся выражениями (4.30) и (4.31), схемой рис. 4.11, а также соотношениями (см. рис. 11.23, а)

$$U_{вх} = U_{3,c} - \gamma\omega; \quad (11.5)$$

$$U_y = k_y U_{вх}; \quad (11.6)$$

$$E_n = k_n U_y, \quad (11.7)$$

где  $E_n$  и  $k_n$  – соответственно ЭДС и коэффициент усиления преобразователя.

Заменяя в (4.30) и (4.31) последовательно  $E_n$  на выражение (11.7), далее  $U_y$  на выражение (11.6) и затем  $U_{вх}$  на выражение (11.5), после несложных преобразований получим следующие формулы для характеристик ДПТ в замкнутой системе:

$$\omega = \frac{k_y k_n U_{з.с}}{c(1+k_c)} - \frac{I(R_\pi + R_n)}{c(1+k_c)} = \omega_0 - \Delta\omega; \quad (11.8)$$

$$\omega = \frac{k_y k_n U_{з.с}}{c(1+k_c)} - \frac{M(R_\pi + R_n)}{c^2(1+k_c)} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (11.9)$$

где  $c = k\Phi_{ном}$ ;  $k_c = \gamma k_y k_n / c$  – 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. Согласно (4.30), (4.31), (11.8) и (11.9)

$$\Delta\omega_p = I(R_\pi + R_n)/c; \quad (11.10)$$

$$\Delta\omega_3 = I(R_\pi + R_n)/c(1+k_c) = \Delta\omega_p(1+k_c). \quad (11.11)$$

Так как  $k_c > 0$ , 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. 11.23, 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  $\omega_0$ . 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  $k_c$  до бесконечности. Из (11.11) видно, что при  $k_c \rightarrow \infty$   $\Delta\omega_3 \rightarrow 0$ , 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 нагруз-

кой 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  $U_{\text{тр}} = \omega \omega_0$ , что в свою очередь согласно (11.5)...(11.7) вызовет увеличение сигналов рассогласования  $U_{\text{вк}}$  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. Схемы ЭП и получаемые характеристики см. в [6, 7].

Регулирование (ограничение) тока и момента двигателя постоянного тока с помощью нелинейной отрицательной обратной связи по току (рис. 11.24, а). В качестве датчика тока в этой системе ЭП используется шунт с сопротивлением  $R_{\text{ш}}$ , падение напряжения на котором пропорционально току якоря  $I$ . В результате сигнал обратной связи по току

$$U_{0,\text{т}} = \beta I, \quad (11.12)$$

где  $\beta$  – коэффициент обратной связи по току, Ом.

Отметим, что в качестве резистора  $R_{\text{ш}}$  часто используется обмотка дополнительных полюсов или компенсационная обмотка двигателя.

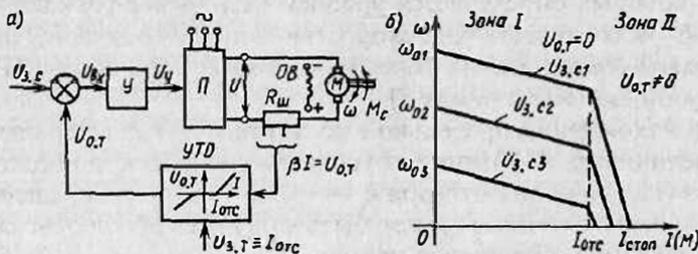


Рис. 11.24

Сигнал обратной связи  $U_{o.r}$  поступает на узел токоограничения УТО, называемый также узлом токовой отсечки, вместе с сигналом задания тока  $U_{z.r}$ , определяющим уровень тока отсечки  $I_{отс}$ , с которого начинается регулирование (ограничение) тока.

Работа УТО в соответствии с его характеристикой  $U_{o.r}(I)$  (см. рис. 11.24, а) происходит следующим образом. При токе в якоре меньше заданного тока отсечки, т. е. пока  $I \leq I_{отс}$ , сигнал обратной связи на выходе УТО равен нулю. Другими словами, ЭП в диапазоне тока якоря от 0 до  $I_{отс}$  является разомкнутым и имеет характеристики, изображенные на рис. 11.24, б в зоне I. При  $I > I_{отс}$  на выходе УТО появляется сигнал отрицательной обратной связи  $U_{o.r} = \beta I$ , 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:

$$U_{вх} = U_{з.с} - \beta I. \quad (11.13)$$

Из (11.13) видно, что при увеличении тока  $I$  сигнал  $U_{вх}$  уменьшается, что в соответствии с (11.6) и (11.7) вызовет уменьшение сигналов  $U_y$  и  $E_n$ . 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)  $U_{z.r}$ . 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. 11.25, 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. 11.3), которые определяют разделение области механических характеристик (см. рис. 11.25, 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



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. 11.4. 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. 11.26, 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  $PT$  и датчик тока  $DT$ , и контура регулирования скорости, содержащего регулятор скорости  $PC$  и датчик скорости (тахогенератор)  $TГ$ .

Регуляторы тока и скорости в большинстве схем ЭП этого типа выполняются на базе операционных усилителей. Включение в цепь задающего сигнала скорости  $U_{3c}$  регулятора скорости  $PC$  и его обратной связи резисторов  $R1$  и  $R_{o.c1}$  обеспечивает изменение (усиление или ослабление) этого сигнала с коэффициентом  $k_1 = R_{o.c1}/R1$ . Аналогично изменение сигнала обратной связи по скорости  $U_{oc}$  происходит с коэффициентом  $k_2 = R_{o.c1}/R2$ . 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  $C_{oc}$  после-

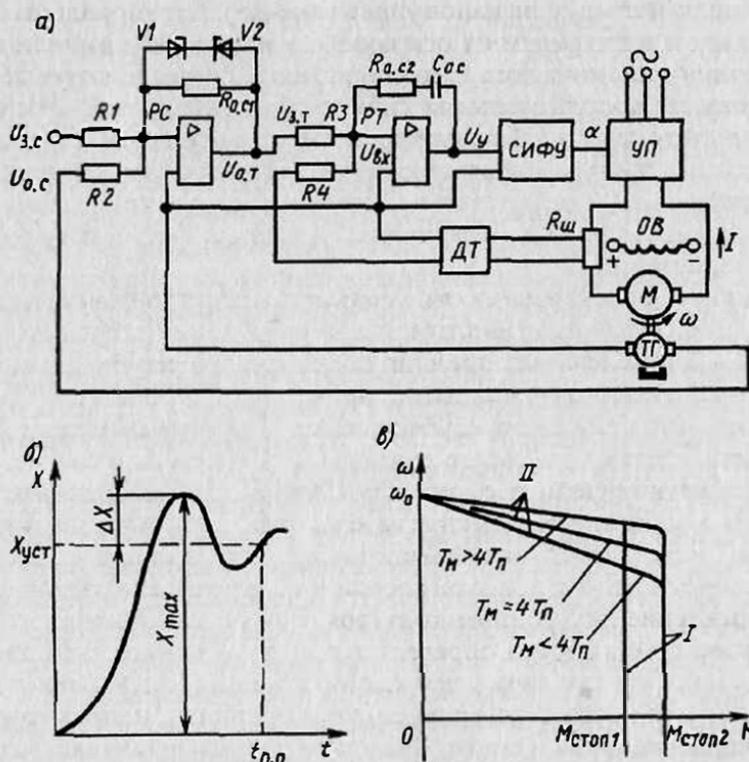


Рис. 11.26

довательно с резистором  $R_{0,сз}$  позволяет получить на выходе  $PT$  сигнал в виде суммы двух составляющих:

$$U_y = k_3 U_{вх} + k_4 \int U_{вх} dt,$$

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 ( $\Pi - I$ ) регулятором.

По каким же критериям и условиям выбираются схема и параметры цепей того или иного регулятора? Основным условием здесь является желаемый (заданный) характер переходных процессов при регулировании координат. Из всех возможных их видов обычно выбираются переходные процессы с затухающими колебаниями (см. рис. 11.26, 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  $\Delta X = X_{\max} - X_{\text{уст}}$  составляет 4,3% от установившегося уровня, а время переходного процесса  $t_{\text{п.д}} = 4,1 T_{\text{п}}$ , где  $T_{\text{п}}$  – электромагнитная постоянная времени тиристорного преобразователя, принимаемая обычно равной 0,01 с. В теории ЭП [2] 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. 11.26, а, для этой цели в цепь обратной связи РС включены стабилитроны V1 и V2, которые, ограничивая выходное напряжение РС, являющееся входным задающим сигналом (уставкой) тока  $U_{3,7}$ , ограничивают тем самым ток и момент двигателя заданным уровнем.

На рис. 11.26, в приведены статические характеристики ЭП с подчиненным регулированием координат и настройкой на технический оптимум. Их особенностью является наличие вертикального участка I, на котором обеспечивается ограничение тока и момента, и участка II с жесткими характеристиками, наклон которых зависит от соотношения двух постоянных времени – электромеханической двигателя  $T_{\text{м}}$  и электромагнитной преобразователя  $T_{\text{п}}$ .

В схемах подчиненного регулирования используется и другой критерий настройки регуляторов по так называемому симметричному оптимуму, который позволяет получить абсолютно жесткие статические характеристики на участке II, 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.

**Замкнутая схема управления электроприводом по системе «источник тока – двигатель постоянного тока».** Силовую часть этой схемы (рис. 11.27, а) образуют источник тока ИТ и ДПТ, обмотка возбуждения которого ОВ подключена к усилителю У, имеющему два входа. По первому входу на усилитель с потенциометра ЗИМ поступает задающий сигнал момента  $U_{3,м}$ , который определяет значение момента на вертикальном участке механической характеристики (см. рис. 11.27, б).

На второй вход усилителя У подается сигнал нелинейной отрицательной обратной связи по скорости  $U_{0,с}$ , которую образуют тахогенератор обратной связи ТГ, вентиль V и задающий потенцио-

метр скорости ЗПС. Цепь обратной связи собирается таким образом, чтобы клапан  $V$  начал пропускать ток по этой цепи только тогда, когда ЭДС тахогенератора превысит задающий сигнал по скорости  $U_{3.c}$ , что произойдет при скоростях, больше скорости отсечки  $\omega_{отс}$ . При скоростях  $\omega < \omega_{отс}$  клапан  $V$  будет закрыт и обратная связь по скорости не будет действовать ( $U_{о.с} = 0$ ).

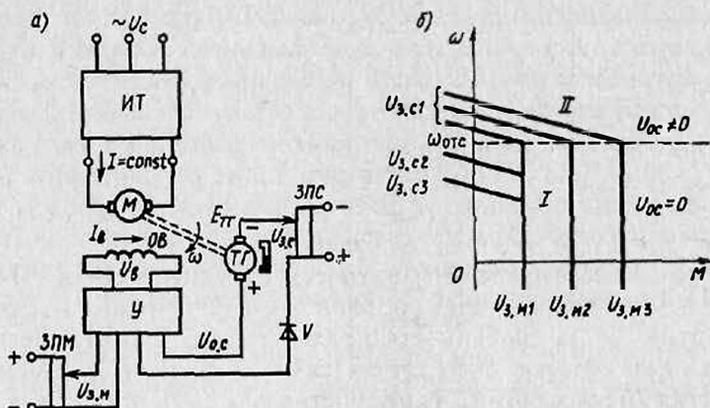


Рис. 11.27

Нелинейный характер обратной связи по скорости определяет наличие двух зон механических характеристик. При  $\omega < \omega_{отс}$  (зона I)  $U_{о.с} = 0$  и на вход усилителя  $У$  подается неизменный по значению сигнал задания момента  $U_{3,м}$ , напряжение же на его выходе  $U_b$ , ток возбуждения  $I_a$  и определяемый им момент  $M$  постоянны, что и определяет вертикальные участки характеристик на рис. 11.27, б.

При  $\omega > \omega_{отс}$  (зона II) открывается клапан  $V$  и на входе усилителя  $У$  появляется сигнал обратной связи по скорости, противоположный по знаку сигналу  $U_{3,м}$ . Тогда суммарный сигнал на входе усилителя  $У$

$$U_y = U_{3,м} - U_{о.с} = U_{3,м} - \gamma\omega. \quad (11.14)$$

Как видно из (11.14), при увеличении скорости сигнал  $U_y$  на входе усилителя  $У$  будет снижаться, пропорционально ему будут уменьшаться напряжение  $U_b$  на выходе усилителя  $У$  и ток возбуждения ДПТ  $I_a$ , а значит, в соответствии с (4.3), и его момент. Механические характеристики при этом приобретают вид наклонных прямых. Таким образом, рассмотренная схема ЭП обеспечивает регулирование двух координат – скорости и момента. Значение сигнала  $U_{3,м}$  определяет уровень момента ДПТНВ в зоне I характеристик, а значение сигнала  $U_{3,с}$  – уровень скорости отсечки (излома) механических



Для уменьшения переменной составляющей уравнивающего тока, протекающего между выпрямительной и инверторной группами, в ЭП используются ограничительные реакторы  $L1$  и  $L2$ . Включение в цепь якоря  $M$  сглаживающего реактора  $L3$  позволяет исключить режим прерывистого тока и повысить тем самым использование ДПТ.

Управление тиристорами  $VS1... VS6$  обеспечивается транзисторной СИФУ, работающей по вертикальному принципу. Она имеет три канала, каждый из которых работает на два тиристора, включенных в одну фазу.

Питание ЭП осуществляется от трехфазного трансформатора  $T$  с двумя вторичными обмотками. К одной из них, имеющей нулевой вывод, подключена силовая часть привода, а ко второй – через выпрямитель  $ВД$  – обмотка возбуждения  $ОВ$  и блок питания  $БП$ , от которого питается схема управления. Обмотка возбуждения тахогенератора  $ОВ$  получает питание от стабилизатора напряжения  $СН$ .

В состав схемы управления ЭП входят промежуточный усилитель  $У1$ , усилитель мощности (эмиттерный повторитель)  $У2$ , узел токоограничения  $УТО$ , узел гибкой обратной связи  $УГОС$ , задающий потенциометр  $РП$ , кнопки управления  $SB1$  и  $SB2$  и пусковое реле  $K$ .

Сигнал управления  $U_{y1}$  формируется как алгебраическая сумма сигналов задающего  $U_3$ , тахогенератора  $U_c$  и токоограничения  $U_{то}$ , для выработки которого используется нелинейная положительная обратная связь по скорости ДПТ. При токе якоря, меньше тока отсечки, работает только контур регулирования скорости. При токе якоря, превышающем ток отсечки, за счет нелинейности цепи токоограничения отрицательная обратная связь по скорости ДПТ отключается и начинает действовать положительная обратная связь, обеспечивая ограничение тока и момента на заданном уровне.

Сигнал управления  $U_{y1}$ , вместе с сигналом корректирующей гибкой обратной связи  $U_{г.о.с}$  поступает на вход усилителя мощности  $У2$  и после усиления в виде результирующего сигнала  $U_{y2}$  подается на вход СИФУ через замыкающий контакт пускового реле  $K$ . Управление этим реле осуществляется с помощью кнопок управления:  $SB1$  используется при пуске ДПТ и  $SB2$  – при его останове. Реверсирование ДПТ осуществляется изменением полярности задающего сигнала  $U_3$ .

В ЭП типа ЭТЗР осуществляется ряд защит, блокировок и сигнализаций. Токовое реле  $КА$ , катушка которого включена в цепь якоря ДПТ, а контакт – в цепь питания реле  $K$ , обеспечивает максимальную токовую защиту ДПТ. При его срабатывании отключается реле  $K$ , с тиристоров снимаются сигналы управления и ДПТ отключается от источника питания.

Автоматические выключатели  $QF1$  и  $QF2$  осуществляют максимальную токовую защиту силовой части тиристорного преобразователя, обмотки возбуждения ДПТ и схемы управления.

Схема электрического привода с использованием микропроцессора. Рассмотрим схему ЭП с двигателем постоянного тока [19] для регулирования положения исполнительного органа робототехнического устройства с использованием микропроцессорного управления (рис. 11.29, а). Этот ЭП должен обеспечивать перемещение и точное позиционирование исполнительного органа робота в соответствии с диаграммой, приведенной на рис. 3.3, для чего в нем используется обратная связь по положению. Для обеспечения высокой точности позиционирования в ЭП осуществляется также регулирование тока (момента) и скорости ДПТ.

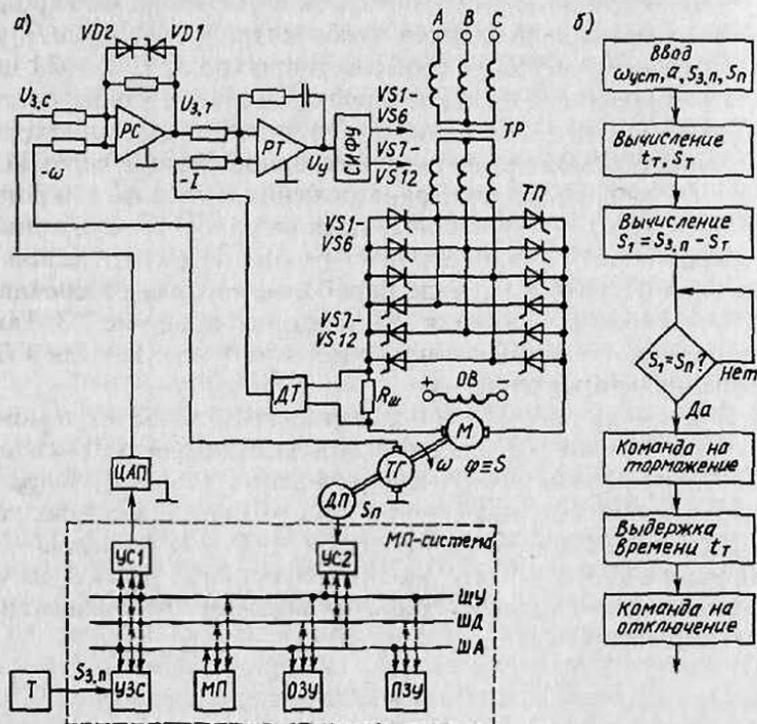


Рис. 11.29

Схема, приведенная на рис. 11.29, а, является характерным примером выполнения подобных схем с применением как аналоговых, так и цифровых узлов и устройств управления. Такие схемы, получившие название цифроаналоговых, существенно улучшают характеристики ЭП.

Силовая часть ЭП включает в себя трехфазный мостовой реверсивный тиристорный преобразователь ТП, питаемый от трансформатора ТР. Схема управления построена по принципу подчиненного регулирования координат.

Регулирование тока производится аналоговым пропорционально-интегральным регулятором тока  $PT$ , на вход которого поступают сигнал обратной связи по току от датчика тока  $DT$  и сигнал задания тока  $U_{3,r}$  с выхода регулятора скорости.

Аналоговый пропорциональный регулятор скорости  $PC$  формирует сигнал задания тока  $U_{3,t}$  на основе своего задающего сигнала  $U_{3,c}$ , поступающего на него с внешнего контура положения, и сигнала обратной связи по скорости, вырабатываемого тахогенератором  $ТГ$ . Стабилитроны  $VD1$  и  $VD2$  ограничивают сигнал на выходе  $PC$ , т. е. обеспечивают ограничение тока и момента двигателя.

Регулирование положения осуществляется с помощью микропроцессорной системы, включающей в себя микропроцессор  $МП$ , устройства памяти  $ОЗУ$  и  $ПЗУ$ , устройства сопряжения  $УС1 \dots УС3$ , цифровой датчик положения  $ДП$  и цифроаналоговый преобразователь  $ЦАП$ . Сигнал задания положения  $S_{3,n}$  поступает (задается) с терминала  $T$ , подключаемого к микропроцессорной системе через  $УС3$ .

Работа цифрового регулятора положения на основе микропроцессорной системы может основываться на одном из двух принципов. Первый из них предусматривает реализацию статической характеристики регулятора в виде параболы, которая обеспечивает оптимальный график движения ЭП, показанный на рис. 3.3. Такой регулятор можно реализовать программным путем, записав в  $ПЗУ$  эту нелинейную характеристику.

Второй принцип работы  $РП$  основывается на вычислении момента начала торможения ЭП, что также позволяет получить показанные на рис. 3.3 кривые движения. Рассмотрим этот способ подробнее.

Реализация способа основана на том, что при известных установившейся скорости  $\omega_{уст}$  и ускорении  $a = (M - M_0)/J$ , где  $J$  – момент инерции ЭП, могут быть рассчитаны время  $t_r$  и путь  $S_r$  на участке торможения ЭП в конце отработки заданного перемещения  $S_{3,n}$  по следующим формулам:

$$t_r = \omega_{уст}/a; \quad S_r = \omega_{уст}^2/(2a). \quad (11.14)$$

Алгоритм работы микропроцессорной системы при выработке сигнала на торможение приведен на рис. 11.29, б. Для его реализации в микропроцессорную систему вводятся данные по величинам  $\omega_{уст}$ ,  $a$ ,  $S_{3,n}$  и сигнал датчика положения  $S_n$ , пропорциональный текущему положению вала двигателя и исполнительного органа. Микропроцессорная система производит вычисление по (11.14) величин  $t_r$  и  $S_r$  и разности  $S_1 = S_{3,n} - S_r$ . Затем сопоставляется значение разности  $S_1$  с сигналом датчика положения  $S_n$ . Как только  $S_1$  станет равной  $S_n$ , от микропроцессорной системы выдается команда на торможение ЭП, начинается отсчет выдержки времени  $t_r$  и по истечении этого времени вырабатывается команда на его отключение.

## 11.8. 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.

**Замкнутая схема управления асинхронного ЭП, выполненного по системе «тиристорный регулятор напряжения – двигатель» (ТРН – АД).** Рассмотрим схему регулирования скорости АД с контактными кольцами и обратной связью по скорости (рис. 11.30, а). В этой схеме между сетью и статором АД включен тиристорный регулятор напряжения ТРН, силовую часть которого образуют три пары соединенных встречно-параллельно тиристоров  $VS1 \dots VS6$ . Управляющие электроды тиристоров подсоединены к выходам СИФУ, которая распределяет управляющие импульсы на все тиристоры и осуществляет их сдвиг в зависимости от входного сигнала управления  $U_y$ . К валу двигателя для реализации обратной связи по скорости подсоединен тахогенератор ТГ, ЭДС которого  $E_{ТГ}$  сравнивается с задающим напряжением скорости  $U_{3,c}$ , снимаемым с задающего по-

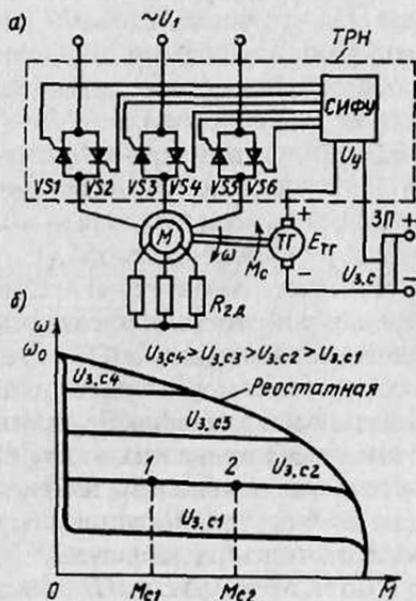


Рис. 11.30

тенциометра *ЗП*. Эти напряжения действуют навстречу друг другу и их разность образует сигнал управления

$$U_y = U_{3c} - E_{ТГ} = U_{3c} - \gamma\omega, \quad (11.15)$$

который поступает на вход *СИФУ*. При увеличении этого сигнала угол управления тиристорами уменьшается, а подаваемое на двигатель напряжение увеличивается, и наоборот. Важно отметить, что при снижении скорости АД в цепи ротора выделяются потери мощности (потери скольжения), которые вызывают его дополнительный нагрев и снижают экономичность работы ЭП. Для облегчения теплового режима при работе двигателя на пониженных скоростях в цепь его ротора включается добавочный резистор  $R_{2в}$ , наличие которого позволяет также расширить диапазон регулирования скорости.

Рассмотрим работу ЭП при изменении момента нагрузки  $M_c$  на валу двигателя и постоянном сигнале задания скорости  $U_{3c2}$ . Допустим, что в исходном положении АД работал в точке 1 с моментом нагрузки  $M_{c1}$  (см. рис. 11.30, б), а затем произошло его увеличение до значения  $M_{c2}$ . В этом случае скорость начнет снижаться и соответственно начнет уменьшаться ЭДС тахогенератора  $E_{ТГ}$ , что вызовет согласно (11.15) увеличение напряжения управления  $U_y$  и уменьшение угла управления тиристорами, а значит, приведет к увеличению подаваемого на АД напряжения. Момент АД будет увеличиваться и в точке 2 сравняется с моментом нагрузки  $M_{c2}$ . Таким образом, увеличение момента нагрузки приводит к небольшому снижению скорости АД, или, другими словами, его характеристики становятся жесткими. При уменьшении момента нагрузки  $M_c$  будет автоматически происходить снижение напряжения на АД, т.е. его скорость вращения будет поддерживаться на заданном уровне.

Изменяя с помощью потенциометра *ЗП* значение задающего напряжения скорости  $U_{3c}$ , можно получить ряд механических характеристик электропривода с относительно высокой жесткостью и необходимой перегрузочной способностью АД.

**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. 11.31, 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  $\Phi$ , обеспечивающий фильтрацию выходного напряжения *УВ* и необходимую циркуляцию реактивной энергии в силовой части схемы.

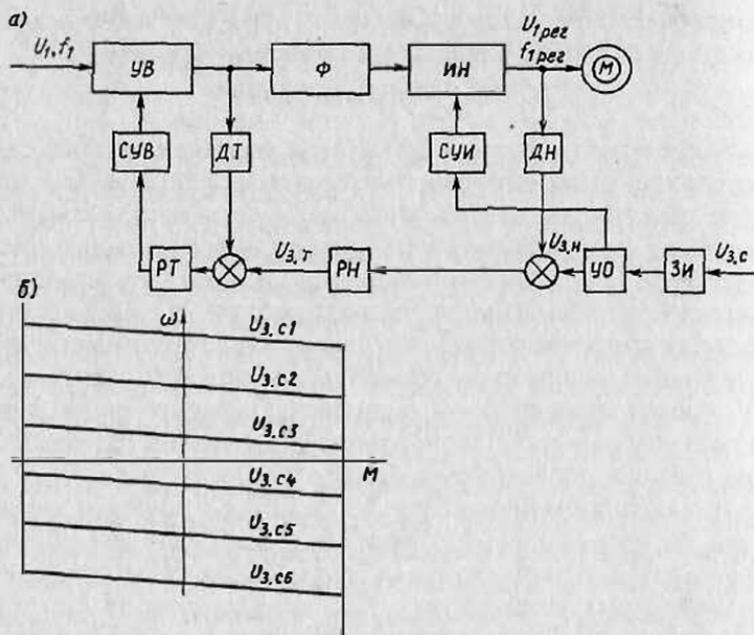


Рис. 11.31

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  $U_{3,с}$  показан на рис. 11.31, 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 датчика 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  $3I_{ном}$ , то система защиты обеспечивает снятие управляющих импульсов с тиристоров инвертора напряжений и одновременное открытие тиристоров специального узла силового токоограничения, включенного параллельно силовому фильтру  $\Phi$ . 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  $0,85U_{ном}$ , обрыва фазы, прекращения принудительной вентиляции тиристоров и тепловая.

**Замкнутая схема импульсного регулирования скорости АД с помощью резистора в цепи ротора.** В схеме ЭП (рис. 11.32) с импульсным регулированием сопротивления в цепи выпрямленного тока ротора для получения жестких характеристик используется отрицательная обратная связь по скорости двигателя. Схема работает следующим образом. В роторную цепь АД включен неуправляемый трехфазный выпрямитель  $B$ , к выходу которого подключен резистор  $R_{2д}$ . Параллельно резистору включен управляемый ключ  $K$  (коммутатор), выполненный, например, по схеме рис. 4.29, а. Управление этим ключом происходит от широтно-импульсного модулятора  $ШИМ$ , на вход которого поступают сигналы задания  $U_{3с}$  и обрат-

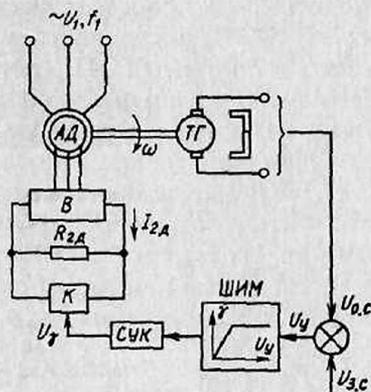


Рис. 11.32

ной связи  $U_{o.c}$  по скорости. При поступлении на вход блока ШИМ сигнала ошибки  $U_y = U_{z.c} - U_{o.c}$  он начинает генерировать импульсы управления, которые с помощью схемы управления ключом СУК распределяются по тиристорам ключа  $K$ , вызывая периодическое включение и закорачивание резистора  $R_{2a}$ .

Принцип получения жестких характеристик ЭП соответствует рассмотренному выше механизму действия обратной связи по скорости и состоит в следующем. Допустим, что АД работает в установившемся режиме при каком-то заполнении (скважности) ключа  $K$ , т.е. при соответствующем эквивалентном сопротивлении цепи ротора. Пусть по каким-то причинам произошло увеличение момента нагрузки АД, в результате чего начинает снижаться его скорость. Тогда в соответствии с формулой (11.15) сигнал управления  $U_y$  начнет повышаться, что вызовет увеличение заполнения  $\gamma$  работы ключа  $K$  и уменьшение эквивалентного сопротивления в цепи ротора  $R_{2эв} = (1 - \gamma) R_{2a}$ . Это, в свою очередь, приведет к увеличению тока в роторе и момента АД, а значит, к прекращению снижения скорости, что соответствует получению жестких характеристик ЭП (см. рис. 5.35). Для обеспечения регулирования (ограничения) тока и момента двигателя данную схему необходимо дополнить контуром регулирования тока. В этом случае механические характеристики будут иметь вертикальный участок, соответствующий заданному уровню ограничения тока и момента.

## 11.9. КОМПЛЕКТНЫЕ И ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

Прогрессивным явлением при создании средств управления и автоматизации технологических процессов являются разработка и выпуск комплектных ЭП (КЭП) постоянного и переменного тока. Комплектным является регулируемый ЭП, поставляемый заказчику вместе со всеми его функциональными элементами (см. рис.1), согласованными по всем своим характеристикам и параметрам уже на стадиях проектирования, конструирования и изготовления.

КЭП находят все более широкое применение во многих отраслях промышленности – станкостроительной, металлургической, машиностроительной и др. Их быстрое распространение определяется более низкой трудоемкостью при разработке и изготовлении, сокращением времени на электромонтажные и наладочные работы, удобством в эксплуатации.

КЭП различаются по напряжению питающей сети, числу двигателей (одно-, двух- или многодвигательные), виду и номинальным параметрам силового преобразователя, наличию или отсутствию

реверса двигателя, виду основной регулируемой координаты (ЭП с регулируемым скоростью, положением, натяжением, мощностью), диапазону и направлению регулирования скорости (однозонные и двухзонные), составу аппаратуры силовой цепи (с линейным контактором или без него), наличию или отсутствию торможения, способу связи с питающей сетью (связь через трансформатор, реактор или без них).

**Комплектный ЭП постоянного тока** характеризуется наиболее широкой номенклатурой. В его состав входят ДПТ с тахогенератором и (или) датчиком положения, тиристорные преобразователи для питания обмоток возбуждения и якоря ДПТ, силовой трансформатор или реактор, сглаживающий реактор, коммутационная и защитная аппаратура (автоматические выключатели, линейные контакторы, рубильники), устройство динамического торможения (при необходимости), схема управления ЭП, блоки питания обмотки возбуждения тахогенератора и электромагнитного тормоза, шкаф высоковольтного ввода (при необходимости), а также комплект аппаратов, приборов и устройств для управления и контроля состояния ЭП.

Датчики технологических параметров рабочих машин и механизмов, а также управляющие и сигнальные устройства, монтируемые на пультах управления, ввиду их специфичности в комплект поставки обычно не входят.

Электротехнической промышленностью выпускается несколько серий КЭП постоянного тока.

Комплектные тиристорные электроприводы серии КТЭУ обладают широким спектром функциональных возможностей. Они выпускаются в однодвигательном и многодвигательном вариантах реверсивного и нереверсивного исполнения как с динамическим торможением, так и без него. КТЭУ мощностью до 2 000 кВт обеспечивают регулирование скорости, положения, ЭДС, мощности и натяжения, а КТЭУ, рассчитанные на мощности до 12 000 кВт, — только регулирование скорости и мощности. На основе этой серии реализуются ЭП со специальными характеристиками.

Серии ЭКТ и КТЭ мощностью соответственно до 2 000 и 1 000 кВт имеют примерно те же функциональные возможности, что и серия КТЭУ, и отличаются только набором и исполнением отдельных блоков. Они могут применяться в различных ЭП, требующих регулирования скорости, положения и натяжения.

Большая группа комплектных ЭП разработана и широко применяется для механизмов станков, роботов, манипуляторов и ряда других подобных рабочих машин и механизмов. К их числу относятся серии ЭТУ 3601, ЭТЗ, ЭТБ, ЭТРП, ЭПУ1, ЭПУ2, ПРП, ЭШИР-1. В этих КЭП применяются высокомоментные двигатели типов ПБСТ, ПГТ, 2П, ПБВ, ДК1, обеспечивающие высокие динамичес-

кие показатели их работы. Эти двигатели имеют встроенные тахогенераторы, с помощью которых реализуется обратная связь по скорости. В состав этих КЭП входят также силовой преобразователь, устройство управления, автоматический выключатель, трансформатор питания, сглаживающий реактор, аппараты защиты и сигнализации. Некоторые из них (ЭТУ 3601, ЭТЗ) имеют также блоки связи с системами числового программного управления (ЧПУ) станков.

Большинство указанных КЭП имеют силовые тиристорные преобразователи, построенные по однофазным или трехфазным, мостовым и нулевым, неререверсивным и реверсивным схемам. В сериях ПРП и ЭШИР-1 используется транзисторный преобразователь с широтно-импульсной модуляцией напряжения (ШИМ).

Схемы управления большинства станочных КЭП построены по принципам подчиненного регулирования координат с П и ПИ регуляторами тока и скорости, что обеспечивает большие диапазоны регулирования скорости. В КЭП для главных движений станка (ЭТЗ, ЭТРП, ЭПУ1) предусматривается управление током возбуждения двигателя с помощью тиристорных преобразователей (возбудителей), чем достигается увеличение диапазона регулирования скорости. Мощность станочных КЭП составляет единицы и десятки киловатт.

**Комплектный электропривод переменного тока** пока имеет более узкую номенклатуру. В качестве примера следует назвать рассмотренный выше серийный ЭП серий ЭКТ и ЭКТ2, выпускаемый на мощности от 19 до 66 кВт·А.

Еще одним примером КЭП переменного тока может служить серия «Размер 2М», применяющаяся в станках с ЧПУ. Этот КЭП предусматривает частотно-токовое управление АД.

**Интегрированный ЭП.** В последние годы для некоторых станков и специальных механизмов стали разрабатываться и применяться ЭП с объединением в единую конструкцию нескольких компонент – двигателя, механической передачи, датчиков координат, а в некоторых случаях и силового преобразователя. Такой электромеханический модуль, называемый иногда мехатронным, позволяет в ряде случаев получать более высокие технико-экономические показатели работы ЭП и технологического оборудования.

## 11.10. СЛЕДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Следящим называется ЭП, который обеспечивает (воспроизводит) с заданной точностью движение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с произвольно изменяющимся входным сигналом управления. Этот механический или электрический сигнал может изменяться в широких пределах по произвольному временному закону. Чаще всего он соответствует скорости или углу

поворота оси или вала задающего устройства. Следящий ЭП применяется в антеннах радиотелескопов, системах спутниковой связи, металлообрабатывающих станках, приводах роботов и манипуляторов, автоматических измерительных приборах и других устройствах.

Следящий ЭП (рис. 11.33) состоит из датчиков входного 1 и выходного 5 сигналов, измерителя рассогласования 2, системы управления 3 и электродвигателя с механической передачей 4, которая приводит в движение исполнительный орган 6 рабочей машины.

Входной и выходной датчики преобразуют механические величины (скорость или угол поворота вала) в электрические – входной сигнал  $U_{вх}$  и сигнал обратной связи  $U_{о.с}$ . Измеритель рассогласования 2, алгебраически суммируя эти сигналы, вырабатывает сигнал рассогласования  $U_{\Delta}$ , поступающий в систему управления электродвигателем 3. Следящий ЭП представляет собой замкнутую структуру, действующую по принципу отклонения.

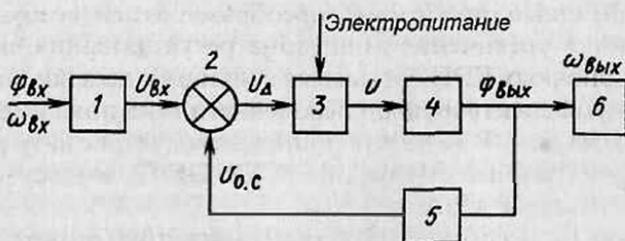


Рис. 11.33

Система управления 3 состоит из регулятора (усилителя) и силового преобразователя, которые обеспечивают необходимое преобразование сигнала рассогласования  $U_{\Delta}$  в напряжение  $U$ , поступающее на двигатель. За счет выбора схем регулятора и преобразователя или введения корректирующих устройств обеспечивается необходимый закон изменения этого напряжения во времени  $U(t)$  при обработке входного воздействия  $\omega_{вх}(t)$  или  $\varphi_{вх}(t)$ .

Электродвигатель с механической передачей 4 в соответствии с законом изменения  $U(t)$  обеспечивает перемещение исполнительного органа 6. Иногда двигатель с механической передачей называют исполнительным механизмом (сервомеханизмом).

Классифицируются следящие ЭП по нескольким признакам: если он предназначен для воспроизведения с заданной точностью скорости движения исполнительного органа, то называется скоростным, а если положения – то позиционным.

Различают также следящие ЭП с непрерывным или прерывным управлением; последние, в свою очередь, могут быть релейными и

импульсными. В следящих ЭП непрерывного действия напряжение, пропорциональное сигналу рассогласования, постоянно подается на двигатель. В следящих ЭП релейного действия напряжение на двигатель подается только в том случае, когда сигнал рассогласования достигает определенного значения. Поэтому релейный следящий ЭП имеет определенную зону нечувствительности по отношению к входному сигналу. Импульсный следящий ЭП отличается тем, что его управляющее воздействие на двигатель подается в виде импульсов напряжения, амплитуда, частота или заполнение которых изменяется в зависимости от сигнала рассогласования. В этих случаях говорят соответственно об амплитудно-, частотно- и широтно-импульсной модуляции сигнала управления.

В следящих ЭП используются двигатели переменного и постоянного тока, различные виды усилителей (электромашинные, магнитные, полупроводниковые, пневматические, гидравлические), датчики скорости и положения и другие аналоговые и цифровые устройства управления.

Рассмотрим несколько схем следящих ЭП.

**Следящий ЭП постоянного тока релейного действия.** В этой схеме ЭП (рис. 11.34) используется ДПТ последовательного возбуждения *M*, имеющий две обмотки возбуждения *OB1* и *OB2*. Управление двигателем осуществляется с помощью силовых транзисторов *VT1* и *VT2*, каждый из которых работает при определенной полярности сигнала согласования  $U_{\Delta}$ , обеспечивая одно из направлений вращения ДПТ. Направление тока якоря в обоих случаях остается неизменным.

Разрядные диоды *VD3* и *VD4* служат для снятия перенапряжений, возникающих при отключении обладающих значительной индуктивностью обмоток возбуждения и якоря.

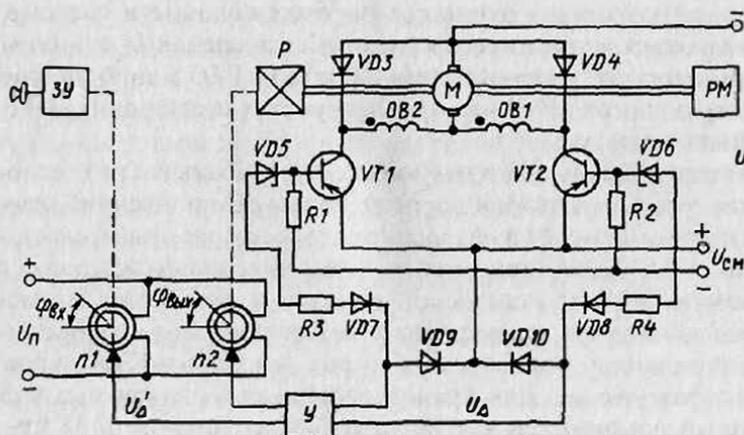


Рис. 11.34

В рассматриваемом следящем ЭП в качестве датчиков входной и выходной величин используются кольцевые потенциометры  $П1$  и  $П2$ , которые образуют так называемый потенциометрический измеритель рассогласования.

Движок потенциометра  $П1$  (датчика входной величины) связан с выходным валом задающего устройства  $ЗУ$ , который представляет собой в данном случае редуктор с ручным приводом. Движок потенциометра  $П2$  (датчика выходной величины) связан с валом редуктора  $Р$ , расположенного на валу ДПТ и рабочей машины  $РМ$ . Редукторы  $ЗУ$  и  $Р$  имеют одинаковое передаточное число. Питание потенциометров  $П1$  и  $П2$  осуществляется напряжением постоянного тока  $U_{п}$ .

Сигнал рассогласования  $U_{\Delta}'$  снимается с движков потенциометров  $П1$  и  $П2$ . При их одинаковом угловом положении, что соответствует нулевому углу рассогласования  $\Delta\varphi = \varphi_{вх} - \varphi_{вых}$ , сигнал  $U_{\Delta}' = 0$ . При этом равен нулю и сигнал  $U_{\Delta}$  на выходе усилителя  $У$ , транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  закрыты и ДПТ неподвижен.

При возникновении рассогласования между угловыми положениями движков потенциометров  $П1$  и  $П2$ , вызванного поворотом рукоятки  $ЗУ$ , сигналы  $U_{\Delta}'$  и  $U_{\Delta}$  становятся отличными от нуля. В зависимости от полярности сигнала  $U_{\Delta}'$ , которая определяется знаком угла рассогласования (ошибки)  $\Delta\varphi$ , сигнал  $U_{\Delta}$  подается на транзистор  $VT1$  (по цепи диод  $VD10$  – стабилитрон  $VD5$  – резистор  $R3$  – диод  $VD7$ ) или  $VT2$  (по цепи диод  $VD9$  – стабилитрон  $VD6$  – резистор  $R4$  – диод  $VD8$ ). Если этот сигнал превышает порог срабатывания стабилитронов  $VD5$  или  $VD6$ , то соответствующий транзистор откроется, подключая ДПТ к источнику питания с напряжением  $U$ . Двигатель начнет вращаться, поворачивая вал рабочей машины  $РМ$  и ось движка потенциометра  $П2$  в направлении, при котором возникшее рассогласование в системе будет уменьшаться и стремиться к нулю. Когда сигнал  $U_{\Delta}$  станет меньше напряжения открывания стабилитронов  $VD5$  или  $VD6$ , работающий транзистор ( $VT1$  или  $VT2$ ) закроется и отключит ДПТ от источника питания.

Таким образом ЭП в данной схеме обрабатывает заданное перемещение  $\varphi_{вх}$  с некоторой погрешностью, обусловленной нечувствительностью системы из-за наличия порога срабатывания стабилитронов  $VD5$ ,  $VD6$ . Зона нечувствительности системы должна быть минимальной в пределах  $2...3^\circ$  угла рассогласования. Большее снижение зоны нечувствительности может привести к возникновению нежелательного колебательного режима работы ЭП около положения равновесия. Для предотвращения такого режима в систему вводятся дополнительные сигналы по первой и второй производным сигнала рассогласования, а также используется электрическое торможение после отключения двигателя.

Достоинствами следящих ЭП релейного принципа действия являются их простота, надежность и возможность получения оптимальных траекторий движения исполнительных органов рабочих машин. К недостаткам таких систем следует отнести их склонность к колебаниям и наличие определенной нечувствительности (неточности) при слежении.

Следящий ЭП переменного тока пропорционального действия. В следящих ЭП широкое применение находят АД, которые отличаются надежностью в работе и долговечностью. При создании маломощных (до 1 кВт) следящих ЭП обычно пользуются двухфазные короткозамкнутые АД, в том числе и с полым ротором (рис. 11.35).

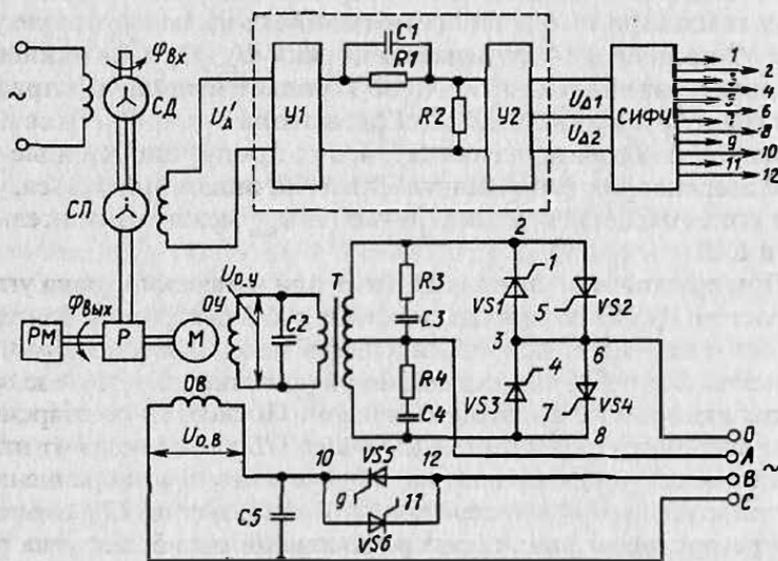


Рис. 11.35

Двигатель  $M$  имеет обмотки возбуждения  $OB$  и управления  $OY$ , которые питаются сдвинутыми по фазе на  $90^\circ$  напряжениями. Регулирование скорости АД осуществляется изменением действующего значения напряжения на  $OY$ , которая получает питание от фазы  $A$  трехфазной сети переменного тока через тиристоры  $VS1 \dots VS4$ . Обмотка возбуждения  $OB$  связана с фазами  $B$  и  $C$  через тиристоры  $VS5$  и  $VS6$ . Тиристоры  $VS1 \dots VS6$  образуют стандартные схемы регуляторов напряжения переменного тока. Они попарно включены по встречно-параллельной схеме, что обеспечивает протекание тока по обмоткам в оба полупериода питающего напряжения.

Располагание между задающей осью и валом ЭП измеряется с помощью сельсинной пары, состоящей из сельсина-датчика

СД и сельсина-приемника СП. Положение ротора СД определяет входной сигнал  $\varphi_{\text{вх}}$ , а положение ротора СП зависит от угла поворота вала электропривода  $\varphi_{\text{вых}}$ . Сигнал рассогласования  $U_{\Delta}'$ , снимаемый с обмотки статора СП, пропорционален разности углов  $\varphi_{\text{вх}}$  и  $\varphi_{\text{вых}}$ , а фаза этого напряжения определяется знаком этой разности (ошибки).

Сигнал рассогласования  $U_{\Delta}'$  подается на вход фазочувствительного усилителя У1. После прохождения через корректирующее звено, состоящее из резисторов  $R1, R2$  и конденсатора  $C1$ , сигнал рассогласования усиливается усилителем У2 и в виде напряжений  $U_{\Delta 1}$  или  $U_{\Delta 2}$  поступает на блок управления тиристорами.

Схема работает следующим образом. При появлении сигнала рассогласования  $U_{\Delta}'$  в зависимости от его фазы на выходе усилителя У2 появляются напряжения  $U_{\Delta 1}$  или  $U_{\Delta 2}$ . При возникновении, например, напряжения  $U_{\Delta 1}$  СИФУ подает импульсы управления на тиристоры  $VS1, VS2, VS5, VS6$ , которые открываются и подают на ОУ и ОВ напряжения  $U_{\text{о.у}}$  и  $U_{\text{о.в}}$ , пропорциональные сигналу рассогласования  $U_{\Delta 1}$ . Двигатель  $M$  начинает вращаться, уменьшая угол рассогласования  $\Delta\varphi = \varphi_{\text{вх}} - \varphi_{\text{вых}}$  между осями сельсинов СД и СП.

При другой фазе сигнала  $U_{\Delta}'$ , т.е. при изменении знака угла рассогласования  $\Delta\varphi$ , на выходе усилителя У2 появляется напряжение  $U_{\Delta 2}$ . Этот сигнал включает тиристоры  $VS3, VS4$ , и на обмотку управления ОУ подается напряжение  $U_{\text{о.у}}$ , сдвинутое по фазе на  $180^\circ$  по сравнению с предыдущим случаем. Поскольку одновременно с этим откроются тиристоры  $VS5, VS6$  и ОВ также получит питание, двигатель  $M$  начнет вращаться, но уже в другом направлении. Таким образом, за счет изменения фазы напряжения  $U_{\text{о.у}}$  осуществляется реверс двигателя  $M$ , обеспечивающий отработку угла рассогласования с любым знаком.

Конденсаторы  $C2 \dots C5$  и резисторы  $R3, R4$  служат для сглаживания пульсаций напряжения на обмотках двигателя.

**Цифроаналоговый позиционный следящий ЭП постоянного тока.** При необходимости получения высокой точности слежения (до 0,001%) в современных ЭП применяются цифровые датчики координат, которые вместе с другими цифровыми устройствами управления (задатчиками, сумматорами, счетчиками и др.) образуют измерительную часть следящей системы. Высокая точность слежения обеспечивается в том случае, когда цифровая измерительная часть ЭП сочетается с аналоговой частью, выполненной по принципу подчиненного регулирования координат. В результате такого соединения образуются так называемые цифроаналоговые схемы ЭП, сочетающие в себе положительные свойства цифровых и аналоговых систем.

Аналоговая часть таких ЭП (рис. 11.36) выполняется по схеме подчиненного регулирования координат, в которой внешний контур регулирования положения цифровой, а внутренние контуры регулирования тока и скорости – аналоговые. Аналоговая часть состоит из регулятора тока  $РТ$ , на который поступают сигналы задания по току  $U_{з,т}$  и обратной связи по току  $U_{о,т}$ , подаваемые соответственно с регулятора скорости  $РС$  и датчика тока  $ДТ$ . Выходной сигнал регулятора тока  $U_{ч}$  является управляющим для реверсивного преобразователя  $ПУ$ , питающего якорь ДПТ независимого возбуждения  $М$ . Регулятор скорости  $РС$  в свою очередь получает сигнал  $U_{з,с}$  от датчика скорости (тахогенератора)  $ВР$  и сигнал  $U_{з,с}$  от задатчика интенсивности  $ЗИ$ , входным сигналом которого является выходной сигнал  $U_{з,с}'$  аналогового регулятора положения  $РП$ .

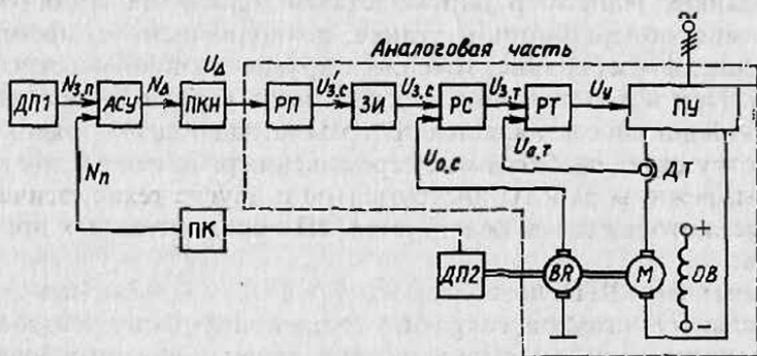


Рис. 11.36

В состав цифровой измерительной части ЭП, формирующей сигнал рассогласования  $U_{\Delta}$ , входят датчики входной  $ДП1$  и выходной  $ДП2$  координат ЭП (его положения), арифметическое суммирующее устройство  $АСУ$ , преобразователь кода в напряжение  $ПКН$  (преобразователь код – аналог) и преобразователь кода положения вала ДПТ в двоичный код  $ПК$ .

Работа цифровой части следящего ЭП происходит следующим образом. Требуемое перемещение ИО рабочей машины вырабатывается задатчиком  $ДП1$  в виде числа  $N_{з,п}$  в двоичном коде. Этот сигнал подается на вход сумматора  $АСУ$  вместе с числовым сигналом  $N_{п}$  (также в двоичном коде), соответствующим действительному положению исполнительного органа рабочей машины. Сумматор суммирует эти два цифровых сигнала и выделяет сигнал рассогласования (ошибки) в цифровом коде  $N_{\Delta}$ , который с помощью преобразователя  $ПКН$  преобразуется в аналоговый сигнал  $U_{\Delta}$  (напряжение постоянного тока), поступающий на вход регулятора положения  $РП$ .

В цифроаналоговом следящем ЭП хорошие динамические показатели обеспечиваются аналоговой частью системы, а высокая точность слежения – цифровой. Элементы и устройства такого ЭП реализуются на основе унифицированной серии аналоговых (УБСР-АИ) и цифровых (УБСР-ДИ) регуляторов.

### 11.11. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Электропривод с программным управлением обеспечивает движение исполнительного органа рабочей машины по определенной, наперед заданной программе. Чаще всего ЭП с таким управлением применяется при обработке деталей на металлообрабатывающих станках. Например, партия деталей должна пройти обработку на многооперационном станке, позволяющем осуществлять сверление, фрезерование, точение и другие технологические операции. При использовании программного управления перед обработкой детали составляется программа, задающая порядок смены инструмента, необходимые перемещения рабочего стола с креплением, режимы работы инструментов и другие технологические данные, которая затем реализуется ЭП исполнительных органов станка.

Применение ЧПУ позволяет резко (в 2...6 раз) увеличить производительность станков, сократить сроки подготовки производства и технологической оснастки при смене детали, уменьшить брак, перейти к многостаночному обслуживанию, обеспечить взаимозаменяемость, что в результате позволяет получить значительный экономический эффект. Использование ЧПУ особенно эффективно при мелкосерийном производстве и частой смене номенклатуры обрабатываемых деталей.

Обобщенная структура ЭП с ЧПУ приведена на рис. 11.37. От программного устройства ПУ сигнал управления  $U_n$  поступает на ЭП, который обеспечивает отработку этого сигнала, перемещая соответствующим образом исполнительный орган ИО. Совокупность программного устройства и ЭП называют системой программного управления СПУ. В этом случае могут использоваться все рассмотренные ранее виды ЭП постоянного и переменного тока.

Все существующие программные устройства делятся на нечисловые (цикловые) и числовые.

**Электроприводы с нечисловыми (цикловыми) программными устройствами** используются для обеспечения повторяющихся одинаковых циклов движения ис-



Рис. 11.37

полнительных органов. В программных устройствах таких электроприводов применяются различные контактные и бесконтактные аппараты релейного действия – конечные и путевые выключатели, шаговые искатели, счетчики, средства программируемой логики. К электроприводам с нечисловыми программными устройствами относятся также системы с использованием шаблонов и копиров, которые применяются в различных копировальных станках и автоматах. В таких системах обычно используется следящий электропривод релейного действия.

В нечисловой СПУ, приведенной на рис. 11.38, электродвигатель *M* приводит в движение исполнительный орган *ИО*, которым может быть, например, суппорт строгального станка, «рука» манипулятора и др. В крайних положениях *ИО* установлены конечные выключатели *SQ1* и *SQ2*, которые вместе с контакторами *K1* и *K2* и кнопками управления *SB1* и *SB2* образуют схему управления двигателем. При включении контактора *K1* двигатель *M* обеспечивает движение исполнительного органа *ИО* в условном направлении «Вперед», а при включении контактора *K2* – в условном направлении «Назад».

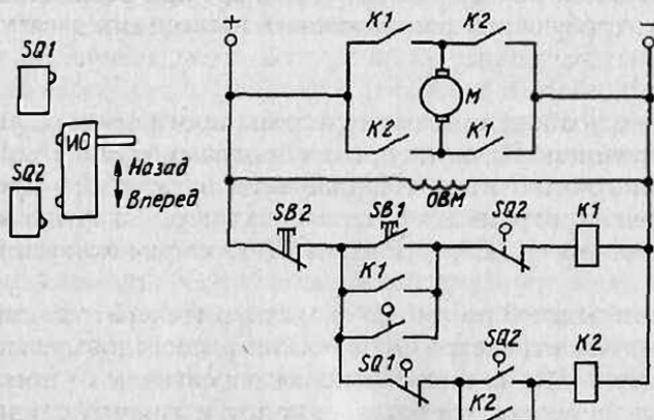


Рис. 11.38

Предположим, что в исходном положении исполнительный орган находится в промежуточном положении и ни один из конечных выключателей не нажат. Для начала работы ЭП необходимо нажать кнопку *SB1*, в результате чего включится контактор *K1* и двигатель *M*, подключившись к питающей сети, обеспечит движение *ИО* в направлении «Вперед».

При подходе *ИО* к конечному выключателю *SQ2* и нажатии на него происходят разрыв цепи катушки контактора *K1* и подключение к источнику питания контактора *K2*. Переключение этих аппа-

ратов изменит на противоположную полярность напряжения на якоре двигателя  $M$ , и он начнет вращаться в обратную сторону, обеспечивая движение  $ИО$  в направлении «Назад».

При подходе  $ИО$  к конечному выключателю  $SQ1$  и нажатии на него происходит обратное переключение в схеме, а именно отключается контактор  $K2$  и включается контактор  $K1$ , после чего исполнительный орган вновь начнет двигаться в направлении «Вперед». Такое цикловое возвратно-поступательное движение будет происходить до тех пор, пока не будет нажата кнопка  $SB2$ .

Приведенную схему можно дополнить счетчиком, который после определенного числа циклов движения  $ИО$  остановит его.

В последнее время широкое применение в схемах программного управления электропривода находят программируемые контроллеры (ПК), представляющие собой специализированные ЭВМ для автоматизации цикловых и последовательных производственных и технологических процессов. Программные контроллеры позволяют реализовывать как простые схемы управления цикловым движением электроприводов, так и сложные системы комплексной автоматизации промышленного оборудования. Применение ПК оказывается экономически целесообразным при реализации схем управления, требующих использования нескольких десятков или сотен обычных электрических аппаратов – реле, логических элементов, счетчиков и др.

Рассмотрим работу цикловой системы программного управления с применением ПК, считая, что в программируемое запоминающее устройство (ПЗУ) с помощью устройства ввода программ (УВП) введена программа, определяющая порядок функционирования системы (рис. 11.39, а). Рабочий цикл схемы включает в себя три этапа.

На первом этапе с помощью сканатора (генератора тактовых импульсов) обеспечивается циклический и последовательный опрос всех входов ПК, на которые подаются сигналы от командных устройств и элементов системы – кнопок и ключей управления, конечных и путевых выключателей, других ЭВМ. Получаемая информация загружается в ПЗУ.

На втором этапе процессор в соответствии с введенной в ПЗУ программой осуществляет логические операции, преобразующие состояние входных сигналов в заданное состояние выходных сигналов. Если состояние входов не изменилось по сравнению с предыдущим циклом сканирования, процессор сохраняет неизменным состояние выходов, в противном случае процессор изменяет их состояние в соответствии с заданной программой.

Опрос участков программы осуществляется циклично, одного за другим, в порядке расположения и возвращением к началу про-

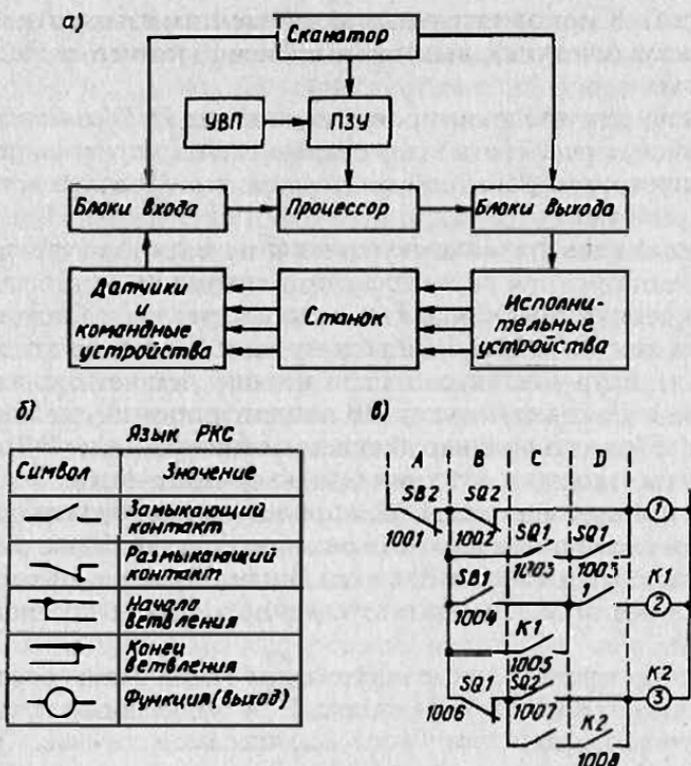


Рис. 11.39

граммы после окончания полного цикла опроса. Время опроса одного цикла (период сканирования) в среднем составляет 2... 10 мс на 1000 слов памяти.

На третьем этапе осуществляется вывод выходных сигналов на исполнительные устройства электроавтоматики станка – электроприводы исполнительных органов, электромагниты и электромагнитные муфты, реле, контакторы и др.

Программа записывается в ПК с помощью различных языков, например в виде уравнений булевой алгебры, мнемокода и стандартных описаний релейных схем, а также языков высокого уровня – PL/M и ФОРТРАН IV. Рассмотрим в качестве примера использование языка релейно-контактных символов (РКС), который прост, нагляден и не требует специальных знаний персонала при программировании.

Язык РКС имеет пять основных логических компонентов (символов) (см. рис. 11.39, б): аргумент (замыкающий контакт), инверсный (обратный) аргумент (размыкающий контакт), начало и конец ветвления параллельной цепи и функцию (выход, например, катушка электрического аппарата или электромеханического ус-

тройства). К дополнительным компонентам языка относятся счет импульсов (счетчик), выдержка времени (таймер) и запоминание (память).

Основу для программирования на языке РКС составляют принципиальные релейно-контакторные схемы управления, которые перед программированием необходимо преобразовать по следующим правилам.

Каждая цепь преобразованной схемы должна иметь одинаковое число (например, четыре) последовательно или параллельно включенных контактов, каждый из которых располагается в одной из четырех зон – *A, B, C, D*. Пятая позиция цепи отводится функции (выходу). Если контактов в цепи меньше, чем четыре, их дублируют, если их больше, в схему ПК вводится промежуточное (фиктивное) реле (память), не нарушающее логики работы исходной цепи. Контакты (входы) и функции (выходы) нумеруются.

Для примера на рис. 11.39, *в* приведена преобразованная таким образом схема циклового управления, показанная на рис. 11.38. В этой схеме в соответствии с указанными правилами введено промежуточное реле *I*, а контакт конечного выключателя *SQ1* дублирован.

Ввод программы после составления такой схемы осуществляется с панели ПК (блок УВП на рис. 11.39, *а*), клавиши которой соответствуют тому или иному логическому символу языка. Кроме того, на панели располагаются декадные переключатели набора номеров цепей и контактов, а также клавиши выбора типа функции (логическая, счетная, временная или запоминания).

Вводимая программа записывается в ПЗУ, после чего ПК может выполнять функции, предусмотренные принципиальной схемой. Выполнение программы будет производиться последовательно по цепям цикловым образом, при этом каждая цепь обрабатывается слева направо.

**Электропривод с числовым программным управлением (ЧПУ)** представляет собой универсальную СПУ. В обрабатывающей промышленности, где она находит основное применение, эта система обеспечивает существенное повышение производительности труда и качества обработки деталей.

При использовании ЭП с ЧПУ все технологические данные по обработке изделий – скорость и перемещение изделий или обрабатывающего инструмента, их направление, последовательность операций при обработке и другие – задаются в виде чисел. Совокупность этих чисел образует программу обработки данного изделия, предварительно рассчитанную, закодированную, записанную на тот или иной программноноситель (перфоленту, перфокарту или магнитную ленту). Перед обработкой изделия программа вводится в про-

граммное устройство ЭП, которое в дальнейшем обеспечивает обработку изделия без непосредственного участия рабочего. Для обработки другого изделия требуется лишь сменить программу, что значительно сокращает время обработки за счет исключения вспомогательных операций (подвода и отвода инструмента, измерения детали, установки подачи и скорости резания и др.).

Системы ЧПУ подразделяются на аналоговые (непрерывные) и дискретные (импульсные). В аналоговых системах ЧПУ совокупность чисел, образующих программу обработки изделия, преобразуется в какую-либо непрерывно изменяющуюся аналоговую физическую величину (напряжение постоянного тока, фазу или амплитуду синусоидального напряжения и др.), которая и является входным управляющим воздействием на ЭП. В дискретных системах ЧПУ программа в конечном итоге представляется последовательностью управляющих импульсов, каждому из которых соответствует определенное перемещение инструмента или изделия. Число импульсов определяет значение перемещения, а их частота — скорость.

Системы ЧПУ работают в двух режимах: позиционирования или контурной обработки. Позиционные (координатные) системы ЧПУ обеспечивают точную установку инструмента относительно изделия или их прямолинейное перемещение. Такие режимы бывают необходимы при фрезеровании, сверлении или расточке нескольких отверстий, а также при точении и строгании изделий. Инструмент или изделие в этом случае перемещается по кратчайшему прямолинейному пути между точками установки (позициями) инструмента. Контурные (функциональные) системы ЧПУ обеспечивают перемещение инструмента или изделия по произвольным траекториям, что требуется при контурной обработке изделий различной конфигурации.

Системы ЧПУ могут быть замкнутыми и разомкнутыми. В замкнутых системах с помощью датчиков измеряется действительное положение инструмента или изделия и эта информация в виде сигнала обратной связи подается в сравнивающее устройство, где она сопоставляется с сигналами программного устройства. При отличии действительного положения от заданного в систему управления ЭП поступают дополнительные управляющие сигналы, обеспечивающие необходимую коррекцию положения инструмента или изделия, а значит, большую точность обработки изделий.

В разомкнутых системах ЧПУ движение инструмента или изделия не контролируется и непосредственно не сопоставляется с заданным. Поэтому случайное изменение параметров системы или какие-либо внешние возмущения, например изменение момента со-

противления на валу привода, вызывают снижение точности обработки программы. Вместе с тем разомкнутые системы проще замкнутых в наладке и эксплуатации.

Процессу обработки изделия на станке с системой ЧПУ предшествует подготовка программноносителя, которая состоит из нескольких этапов.

Исходными данными для составления программы обработки изделия являются технологические данные: размеры заготовки, чертеж изделия, материал заготовки, характеристика инструмента, необходимая степень точности изготовления изделия, характер и вид обработки.

На первом этапе составления программы изготавливается специальный чертеж, в котором изделие изображается в системе прямоугольных координат  $XU$  (при объемной обработке вводится и третья координата  $Z$ ). Далее в принятой системе координат программируется перемещение инструмента (изделия), при этом для позиционных систем ЧПУ программируется перемещение между двумя последовательно обрабатываемыми точками, а для контурной системы ЧПУ – перемещение центра инструмента (изделия) по требуемой траектории.

На следующем этапе подготовки программы составляется технологическая карта обработки изделия, в которой определяется последовательность всех перемещений инструмента (изделия) с указанием скорости, подачи и глубины резания, а также значения перемещений по координатным осям. Для удобства ввода и сокращения длины программноносителя все данные технологической карты кодируются. В системах ЧПУ наиболее распространенными являются двоичный и двоично-десятичный коды. Одним из самых распространенных является код 1–2–4–8, имеющий обычные десятичные разряды  $10^0$ ,  $10^1$ ,  $10^2$  и т.д., в каждом из которых используются лишь числа 1, 2, 4, 8 («веса» кода), изображаемые в двоичном коде. Например, число 439 в этом коде записывается так:  $439 = 4 \cdot 10^2 + (1 + 2) \cdot 10^1 + (1 + 8) \cdot 10^0$ . Двоично-десятичные коды сочетают в себе емкость десятичных кодов и удобство представления информации на программноносителе, характерное для двоичных кодов.

Программа на программноносителе записывается в виде отдельных «фраз» (блоков). Каждый блок содержит всю информацию по обработке изделия на данном этапе технологического цикла – направление и скорость перемещения по координатным осям, режимы обработки, охлаждения и др. Эта информация выражается с помощью отдельных слов, каждое из которых определяет или значение перемещения по осям координат, или его скорость и направление, или какие-либо вспомогательные команды. Для примера на рис. 11.40 показан участок пятидорожечной перфоленты (шестая – ведущая – дорожка на рисунке не показана) с частью записанной программы, соответствующей одной фразе.

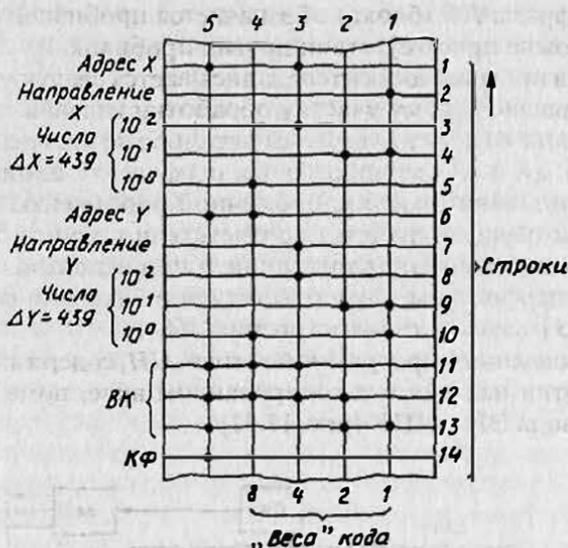


Рис. 11.40

Фраза начинается с адреса, по которому должна направляться информация следующих за адресом слов. Адрес задается пробитыми отверстиями на пятой дорожке и еще на одной из дорожек. В данном примере адрес для координаты  $X$  соответствует пробитым отверстиям на пятой и третьей дорожках первой строки, а для координаты  $Y$  — на пятой и четвертой дорожках шестой строки. Вся информация до следующего по порядку адреса принадлежит одной координате.

Следующее за адресом слово (вторая строка) определяет направление перемещения по данной координате, задаваемое в каком-либо условном числовом коде. Так, здесь положительные направления  $+X$  и  $+Y$  задаются соответственно одной пробивкой на первой и третьей дорожках, а отрицательные направления  $-X$  и  $-Y$  — пробивкой на второй и четвертой дорожках.

За строкой, задающей направление перемещения, следует число, определяющее значения перемещений изделия  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  на данном участке. Они задаются в двоично-десятичном коде 1-2-4-8: 1 — на первой дорожке, 2 — на второй дорожке, 4 — на третьей дорожке, 8 — на четвертой дорожке. В рассматриваемом примере

$$\Delta X = \Delta Y = 439 = 4 \cdot 10^2 + (1+2) \cdot 10^1 + (1+8) \cdot 10^0.$$

За строками, содержащими числовые данные, располагаются строки 11...13 с закодированными вспомогательными командами  $VK$ , которым соответствует пробивка на пятой дорожке в сочетании с пробивками на других дорожках.

Конец фразы *КФ* (блока) обозначается пробивкой отверстия на пятой дорожке при отсутствии других пробивок.

Далее на программоносителе записывается следующая фраза, соответствующая другому участку обработки изделия, и т. д.

В системах ЧПУ используются пятидорожечная перфолента шириной 17,5 мм и восьмидорожечная перфолента шириной 24,5 мм. При использовании восьмидорожечной перфоленты кодирование программы осуществляется в соответствии с кодом Международной организации по стандартизации, а при использовании пятидорожечной перфоленты – в соответствии с буквенно-цифровым кодом БЦК-5 (нормаль станкостроения Э68-1).

Подготовленный программоноситель *ПН*, содержащий программу обработки изделия в закодированном виде, помещается в устройство ввода ЭП с ЧПУ (рис. 11.41).

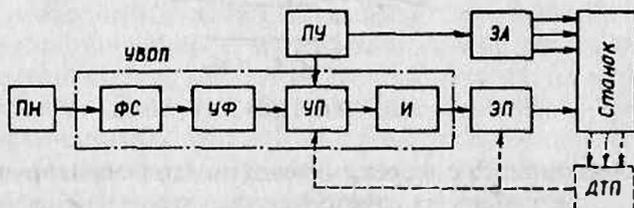


Рис. 11.41

В устройстве ввода и обработки программы *УВОП* с помощью фотосчитывателя *ФС* и усилителя-формирователя *УФ* осуществляется покадровое считывание и преобразование закодированной информации программоносителя *ПН* в электрические сигналы. Пока информация с одного считываемого кадра записывается в буферную (промежуточную) память, в рабочей памяти и последующих блоках системы ЧПУ осуществляется обработка информации предыдущих кадров. По мере освобождения рабочей памяти в нее переводится информация из буферной памяти, что обеспечивает непрерывность процесса управления станком. Буферная и рабочая память входят в устройство памяти *УП*.

Из устройства памяти электрические сигналы поступают на вход интерполятора (дешифратора) *И*, который преобразует эти закодированные сигналы в последовательность электрических импульсов (так называемый унитарный код) и подает их на вход *ЭП*. Последний, осуществляя отработку этой последовательности импульсов, обеспечивает перемещение исполнительного органа станка, при этом число импульсов определяет перемещение, а частота их следования – его скорость. Устройство памяти *УП* связано с пультом управления *ПУ*.

Система ЧПУ обеспечивает также соответствующее управление различными электромеханическими и электромагнитными устройствами, например электромагнитными муфтами, электромагнитами различных механических приспособлений станка, катушками реле и контакторов, которые на схеме условно обозначены блоком электроавтоматики ЭА.

Схема ЭП с ЧПУ, приведенная на рис. 11.41, может быть дополнена датчиками параметров технологического процесса обработки детали (блок ДТП) и координат электропривода. В этом случае система ЧПУ становится замкнутой и обеспечивает более высокое качество обработки деталей. Кроме того, схема ЭП с ЧПУ содержит ряд не показанных на рисунке блоков и устройств, обеспечивающих контроль ввода программы, ее выключение и защиту, а также различные блокировки и сигнализации при работе электрооборудования станка.

Часто оказывается удобным записывать программу на магнитную ленту, что позволяет получать большую плотность записи программы и производить операции считывания и декодирования на отдельно расположенных от станка устройствах. Запись производится в несколько дорожек, часть из которых содержит информацию о перемещениях по координатам, а часть — о направлении движения, режимах резания, применяемых инструментах и др.

Информация на магнитной ленте записывается в виде так называемого унитарного кода, т.е. непрерывной последовательности импульсов управления, обеспечивающих перемещение исполнительных органов станка в соответствии с их числом.

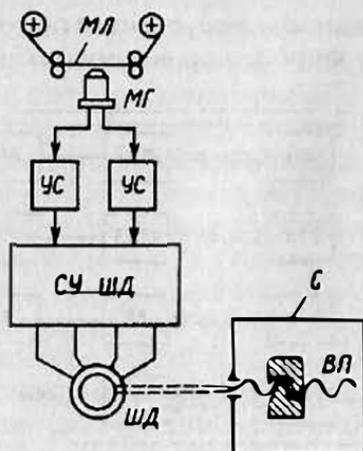


Рис. 11.42

Для примера рассмотрим структурную схему системы ЧПУ с шаговым двигателем (рис. 11.42), с помощью которого стол фрезерного станка перемещается по одной координате.

Программа перемещения стола, записанная на магнитную ленту *МЛ* в виде унитарного кода, считывается с помощью магнитной головки *МГ*. В зависимости от требуемого направления движения импульсы направляются по одному из каналов управления и после усиления в блоках *УС* поступают на вход системы управления шаговым двигателем *СУ ШД*.

Двигатель обрабатывает командные импульсы и через механическую винтовую передачу *ВП* перемещает стол *С*. Общее число импульсов определяет перемещение стола, а их частота – скорость этого перемещения. Для движения стола по другой координате используется аналогичный ЭП.

По своим техническим возможностям и особенностям структуры системы ЧПУ подразделяется на четыре группы, имеющие в соответствии с международной классификацией обозначения *HNC*, *SNC*, *CNC* и *DNC*.

Система *HNC* (Hand numerical control) обеспечивает оперативное управление посредством ручного задания программы с пульта управления. Система *SNC* (Stored numerical control), имеющая устройство памяти для хранения программ, обеспечивает обработку партии одинаковых заготовок, производя единственное считывание программы перед обработкой. В системе *CNC* (Computer numerical control) используются микроЭВМ, позволяющие программировать работу и вырабатывать требуемый алгоритм управления. Система *DNC* (Direct numerical control) позволяет осуществлять прямое цифровое управление группой станков с ЧПУ с системами *SNC* и *CNC*.

В настоящее время наибольшее развитие получили системы ЧПУ с использованием микропроцессоров и микроЭВМ (рис. 11.43).

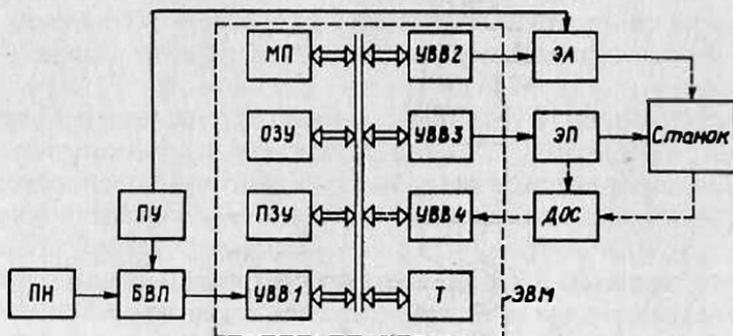


Рис. 11.43

Управляющая программа вводится в ЭВМ с программноносителя *ЛН* (или пульта управления *ЛУ*) через блок ввода программы *БВП* и устройства ввода-вывода *УВВ1*. Далее она поступает в устройство памяти микроЭВМ. В постоянном запоминающем устройстве *ПЗУ* хранятся постоянные части программы, данные для декодирования, интерполирования и необходимых вычислений.

В оперативное запоминающее устройство *ОЗУ* поступает кроме данных управляющей программы текущая информация от датчиков обратной связи *ДОС* о ходе технологического процесса, состоянии защит и блокировок, определяющая управляющее воздействие на ЭП и устройства электроавтоматики станка *ЭА*. Связь микроЭВМ с электрооборудованием станка осуществляется через устройства ввода-вывода *УВВ2 – УВВ4*. Кроме того, ЭВМ включает в себя микропроцессор *МП* и таймер *Т*.

Применение микроЭВМ в системах ЧПУ повышает их функциональные возможности, например позволяет с помощью программы управлять станком, осуществлять диалоговый режим между оператором и станком, производить диагностику состояния станка и системы ЧПУ, реализовывать универсальный (позиционный и контурный) режим обработки деталей.

Кроме того, микроЭВМ позволяет осуществлять управление несколькими электроприводами, обеспечивающими движение инструмента (детали) по различным координатам.

## 11.12. ЭЛЕКТРОПРИВОД С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Работа некоторых рабочих машин и производственных механизмов характеризуется случайным изменением в широких пределах условий технологических процессов и различных действующих на них возмущающих воздействий. Для обеспечения наилучшего хода таких технологических процессов ЭП должен иметь возможность изменять соответствующим образом характер своей работы.

Электропривод, функционирование системы управления которого автоматически и целенаправленно изменяется с целью осуществления наилучшего протекания технологического процесса, называется ЭП с адаптивным или самоприспосабливающимся управлением. Другими словами, ЭП с адаптивным управлением обеспечивает оптимальный ход технологического процесса по заданному показателю качества при изменяющихся возмущениях и условиях работы. Автоматическое изменение функционирования системы управления ЭП называется адаптацией, или самоприспособлением.

Если в ЭП с адаптивным управлением целенаправленно изменяются параметры системы управления, то привод называется *само-настраивающимся*, если изменяются параметры и структура системы управления, – *самоорганизующимся*, если изменяются параметры, структура и закон управления с использованием опыта функционирования ЭП, – *самообучающимся*.

Для осуществления адаптивного управления ЭП служит устройство адаптивного управления (УАУ), которое формирует сигналы управления, обеспечивающие заданный показатель качества технологических процессов, например наивысшую производительность рабочей машины, минимальную стоимость обрабатываемой детали и др.

В общем случае УАУ должно обеспечивать или поддержание этого показателя качества на заданном уровне (*системы стабилизации*), или получение его экстремального значения (*экстремальные системы*).

Системы стабилизации чаще всего основываются на использовании модели технологического процесса, с помощью которой обеспечивается близость характеристик реального и целесообразного (оптимального) технологического процесса.

В экстремальных адаптивных системах параметры системы управления настраиваются на экстремальное значение заданного показателя качества технологического процесса.

По способу получения информации о текущем значении показателя качества экстремальные системы подразделяются на *поисковые* и *беспоисковые*. В поисковых системах показатель качества достигается за счет введения в систему дополнительных поисковых сигналов. В беспоисковых (аналитических) системах он рассчитывается аналитически с помощью специального вычислительного устройства. Если поисковые сигналы генерируются самой системой управления, то такая система называется экстремальной системой с автоколебательным поиском экстремума. При использовании специального дополнительного источника поисковых сигналов реализуется система с принудительным поиском экстремума.

По количеству переменных, от которых зависит показатель качества, экстремальные системы подразделяются на одномерные и многомерные, также они классифицируются по методам поиска алгоритма нахождения экстремума (например, Гаусса-Зайделя, градиента, наискорейшего спуска и др.).

Примером поисковой адаптивной системы управления ЭП может служить система поиска минимального значения тока статора АД в системе ТРН-АД (см. разд. 5.5), при котором потери в двигателе оказываются минимальными. Регулируемой координатой АД как объекта управления в этом случае является ток статора, управляющей координатой – напряжение питания двигателя, а возмущающим воздействием – момент нагрузки на валу двигателя.

### Контрольные вопросы

1. В каких случаях требуется создание замкнутых схем ЭП?
2. Какова структура силовой части большинства замкнутых ЭП?
3. Какие функциональные аналоговые элементы управления применяются в замкнутых ЭП?
4. Что такое операционный усилитель?
5. Какие функциональные преобразования и за счет чего может осуществлять операционный усилитель?
6. Какие функциональные цифровые элементы управления применяются в замкнутых ЭП?
7. Кратко охарактеризуйте наиболее распространенные цифровые узлы.
8. Что такое двоичный, восьмеричный и шестнадцатеричный цифровые коды?
9. Какие датчики координат применяются в замкнутых ЭП?
10. Что такое микропроцессор, микроЭВМ и микропроцессорная система?
11. Какой ЭП называется комплектным?
12. Приведите примеры комплектных ЭП и серийных замкнутых ЭП постоянного и переменного тока.
13. Какой ЭП называется следящим?
14. Как работает ЭП с программным управлением?
15. В чем особенности работы ЭП с ЧПУ?
16. Какое управление ЭП называется адаптивным?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ и синтез систем управления электроприводов постоянного тока / Под ред. В. А. Елисеева. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1984. – 84 с.
2. Беляев А. В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.
3. Вешневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
4. Голован А. Т. Основы электропривода. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 344 с.
5. ГОСТ Р 50369–92. Электроприводы. Термины и определения. Госстандарт России.
6. Ильинский Н. Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. – М.: Энергоиздат, 1981. – 144 с.
7. Ильинский Н. Ф., Козаченко В. Ф. Общий курс электропривода: – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
8. Ключев В. И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
9. Ковчин С. А., Сабинин Ю. А. Основы электропривода. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
10. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И. Х. Евзеров, А. С. Горобец, Б. И. Мошкович и др.; Под ред. В. М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
11. Марголин Ш. М. Дифференциальный электропривод. – М.: Энергия, 1975. – 168 с.
12. Москаленко В. В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
13. Москаленко В. В. Электрический привод. – М.: Высш. шк., 1991. – 430 с.
14. Основы автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
15. Применение микропроцессорных систем в энергетике и радиоэлектронике / А. Н. Дорошенко, Ю. Н. Евланов, Л. А. Ильяшенко, и др.; Под ред. В. А. Мясникова, А. А. Дерюгина. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1986. – 100 с.
16. Справочник по автоматизированному электроприводе / Под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
17. Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
18. Транзисторный электропривод на базе синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов для станков и промышленных роботов / А. Д. Поздеев, В. В. Горчаков, Н. В. Донской и др. // Электротехника. – 1988. – № 2. – С. 10–14.
19. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

20. Шёнфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы: Пер. с нем. / Под ред. Ю. А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.
21. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М. М. Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, В. А. Ладензон. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.
22. Электрические и электронные аппараты / Под ред. Ю. К. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 752 с.
23. Электроприводы постоянного и переменного тока с улучшенными динамическими и энергетическими показателями. – Тр. Моск. энерг. ин-та, 1982. – Вып. 570. – 108 с.
24. Электротехнический справочник. Использование электрической энергии / Под общ. ред. И. Н. Орлова и др. – 7-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – Кн. 2. – 616 с.
25. Энергосберегающие технические решения в электроприводе / Под ред. А. О. Горнова. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 56 с.
26. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства / Под ред. В. А. Веникова. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе / Н. Ф. Ильинский, Ю. В. Розжанковский, А. О. Горнов. – М.: Высш. шк., 1989. – 127 с.
27. Яуре А. Г., Певзнер Е. М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	5
<b>Глава 1. Основные понятия .....</b>	<b>7</b>
1.1. Назначение и виды электроприводов .....	7
1.2. История развития электропривода и его роль в современных технологиях .....	9
<b>Глава 2. Механика электропривода .....</b>	<b>12</b>
2.1. Уравнение движения электропривода .....	12
2.2. Расчетные схемы механической части электропривода. Одномассовая схема .....	13
2.3. Многомассовые расчетные схемы .....	18
2.4. Установившееся движение электропривода и его устойчивость .....	20
2.5. Неустановившееся движение электропривода при постоянном динамическом моменте .....	23
2.6. Неустановившееся движение при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа .....	25
2.7. Неустановившееся движение электропривода при произвольном динамическом моменте .....	28
<b>Глава 3. Регулирование координат электропривода .....</b>	<b>32</b>
3.1. Регулирование скорости .....	33
3.2. Регулирование момента и тока .....	36
3.3. Регулирование положения .....	38
3.4. Структуры электропривода, применяемые при регулировании координат .....	39
<b>Глава 4. Электроприводы с двигателями постоянного тока .....</b>	<b>41</b>
4.1. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....	42
4.2. Энергетические режимы работы двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....	45
4.3. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения с помощью резисторов в цепи якоря .....	47
4.4. Расчет регулировочных резисторов в цепи якоря .....	49
4.5. Регулирование тока и момента при пуске, торможении и реверсе .....	52

4.6. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением магнитного потока .....	55
4.7. Регулирование координат электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения якоря. Система «преобразователь – двигатель» ....	58
4.8. Переходные процессы в разомкнутой системе «преобразователь–двигатель» .....	65
4.9. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения в схеме с шунтированием якоря .....	74
4.10. Регулирование координат в системе «источник тока – двигатель» .....	75
4.11. Импульсное регулирование скорости электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения .....	77
4.12. Схема включения, статические характеристики и режимы работы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....	82
4.13. Регулирование координат электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения с помощью резисторов. Расчет регулировочных резисторов ....	85
4.14. Регулирование скорости двигателя с последовательным возбуждением изменением магнитного потока, напряжения и шунтированием резистором якоря .....	88
4.15. Торможение электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения .....	91
4.16. Свойства и характеристики электропривода с двигателем постоянного тока смешанного возбуждения .....	93

## Глава 5. Электроприводы с асинхронным двигателем .....

5.1. Схема включения, статические характеристики и режимы работы асинхронного двигателя .....	96
5.2. Регулирование координат асинхронного двигателя с помощью резисторов .....	104
5.3. Расчет регулировочных резисторов .....	106
5.4. Регулирование координат электропривода с асинхронным двигателем изменением напряжения .....	111
5.5. Повышение экономичности работы асинхронного электропривода с помощью регулятора напряжения .....	114
5.6. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения .....	115
5.7. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов .....	128
5.8. Регулирование скорости асинхронного двигателя в каскадных схемах его включения .....	131
5.9. Импульсный способ регулирования координат электропривода с асинхронным двигателем .....	135
5.10. Торможение асинхронного двигателя .....	137
5.11. Особенности переходных процессов в асинхронном двигателе и их формирование .....	141

5.12. Электропривод с однофазным асинхронным двигателем .....	145
5.13. Электропривод с линейным асинхронным двигателем .....	149
<b>Глава 6. Электроприводы с синхронными двигателями .....</b>	<b>152</b>
6.1. Схема включения, статические характеристики и режимы работы синхронного двигателя .....	153
6.2. Пуск синхронного двигателя .....	154
6.3. Регулирование скорости и торможение синхронного двигателя .....	157
6.4. Синхронный двигатель как компенсатор реактивной мощности .....	158
6.5. Особенности переходных процессов электропривода с синхронным двигателем .....	160
6.6. Электропривод с вентильным двигателем .....	160
6.7. Электропривод с шаговым двигателем .....	163
6.8. Вентильно-индукторный электропривод .....	171
<b>Глава 7. Взаимосвязанный электропривод .....</b>	<b>173</b>
7.1. Электропривод с механическим соединением валов двигателей .....	174
7.2. Электропривод с механическим дифференциалом .....	177
7.3. Электропривод с электрическим валом .....	178
<b>Глава 8. Энергетика электропривода .....</b>	<b>183</b>
8.1. Потери мощности и энергии в установившемся режиме работы электропривода .....	184
8.2. Потери мощности и энергии в переходных режимах электропривода .....	188
8.3. Коэффициент полезного действия электропривода .....	196
8.4. Коэффициент мощности электропривода .....	198
8.5. Энергосбережение средствами электропривода .....	205
<b>Глава 9. Выбор и проверка двигателей и резисторов .....</b>	<b>209</b>
9.1. Расчет мощности и выбор двигателей .....	209
9.2. Проверка двигателей по нагреву прямым методом .....	214
9.3. Проверка двигателей по нагреву косвенными методами .....	218
9.4. Выбор и проверка по нагреву резисторов в силовых цепях двигателей .....	226
<b>Глава 10. Разомкнутые схемы управления электропривода .....</b>	<b>229</b>
10.1. Электрические аппараты ручного управления .....	230
10.2. Электрические аппараты дистанционного управления .....	232
10.3. Датчики времени, скорости, тока и положения .....	237
10.4. Виды и аппараты защиты, блокировок и сигнализации в электроприводе .....	244
10.5. Бесконтактные логические элементы .....	253
10.6. Электромагнитные муфты и тормозные устройства .....	257
10.7. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с двигателями постоянного тока .....	260

10.8. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с асинхронными двигателями .....	269
10.9. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с синхронными двигателями .....	277
10.10. Выбор аппаратов коммутации, управления и защиты .....	280
<b>Глава 11. Замкнутые схемы управления электропривода .....</b>	<b>283</b>
11.1. Схемы замкнутых структур электропривода .....	283
11.2. Технические средства замкнутых схем управления электропривода .....	286
11.3. Аналоговые элементы и устройства управления электропривода .....	289
11.4. Дискретные элементы и устройства управления электропривода .....	297
11.5. Датчики скорости и положения, применяющиеся в замкнутых схемах управления .....	308
11.6. Микропроцессорные средства управления электропривода ....	313
11.7. Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями постоянного тока .....	320
11.8. Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями переменного тока .....	334
11.9. Комплексные и интегрированные электроприводы .....	338
11.10. Следящий электропривод .....	340
11.11. Электропривод с программным управлением .....	347
11.12. Электропривод с адаптивным управлением .....	358
<b>Приложение 1. Список литературы .....</b>	<b>361</b>

*Учебное издание*

**Москаленко Владимир Валентинович**

## **Электрический привод**

Учебное пособие

Редактор *В.Н. Махова*

Технический редактор *Е.Ф. Коржуева*

Компьютерная верстка: *И.В. Земскова*

Корректоры *А.П. Сизова, А.В. Черкасова*

Диапозитивы предоставлены издательством

Подписано в печать 06.11.2000. Формат 60×90/16. Гарнитура «Таймс». Бумага тип. № 2.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 23. Тираж 30000 экз. (1-й завод 1–15000 экз.).  
Заказ № 3098.

Лицензия ИД № 00520 от 13.12.1999. Издательство «Мастерство».  
105043, Москва, ул. 8-я Парковая, 25. Тел./факс: (095) 165-3230, 367-0798, 305-2387.

Лицензия ИД № 02025 от 13.06.2000. Издательский центр «Академия».  
105043, Москва, ул. 8-я Парковая, 25. Тел./факс: (095) 165-4666, 367-0798, 305-2387.

Лицензия ЛР № 010146 от 25.12.96. ГУП Издательство «Высшая школа».  
101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/4.

Отпечатано на Саратовском полиграфическом комбинате,  
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.