

**Новосибирский ГАУ**  
**Инженерный институт**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД**  
Практикум

Новосибирск 2017

УДК 631.3 – 83 + 621.3 (075)  
ББК 40.76, Я 73  
Э 453

Кафедра техносферной безопасности и электротехнологий

Составители: ***А.Ю. Кузнецов***, канд. техн. наук, доц.  
***Д.С. Болотов***, аспирант.

Рецензент доцент, канд. техн. наук ***А.Т. Калюжный***

**Автоматизированный электропривод:** практикум /  
Новосиб. гос. аграр. ун-т, Инженер. ин-т; сост.: А.Ю. Кузнецов,  
Д.С. Болотов. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2017.  
– 54 с.

Содержит основные сведения по теории и расчету электроприводов. Приведены примеры и решения типовых задач.

Предназначен для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, по профилю - Электрооборудование и электротехнологии в агропромышленном комплексе.

Утвержден и рекомендован к изданию методическим советом Инженерного института (протокол №8 от 28 марта 2017 года).

© Новосибирский ГАУ, 2017

## **ВВЕДЕНИЕ**

Предназначен для проведения практических занятий по дисциплине «Автоматизированный электропривод». Он знакомит студентов с основными теоретическими положениями расчета и проектирования электропривода.

Задачи и примеры посвящены вопросам оценки и расчета механических и регулировочных характеристик электроприводов с двигателями постоянного и переменного тока, в том числе с релейным управлением посредством регулируемых сопротивлений в цепях электродвигателей.

В процессе выполнения практических заданий и работ студенты приобретают навыки управления координатами электропривода и их регулирования, умение исследовать и анализировать его характеристики.

Практикум составлен в соответствии с программой курса «Автоматизированный электропривод» для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, по профилю - Электрооборудование и электротехнологии в агропромышленном комплексе.

При составлении практикума были использованы учебники по электроприводу М.Г. Чиликина, А.С. Сандлера, В.В. Москаленко, И.Я. Браславского, Н.Ф. Ильинского и др.

# 1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

## 1.1. Классификация электроприводов

Большое число реализуемых с помощью электропривода технологических процессов определяет многообразие уже действующих и вновь создаваемых электроприводов. Между собой они различаются назначением, степенью автоматизации, характером движения двигателя, используемой элементной базой и многими другими признаками, по которым осуществляется их классификация. История электропривода показывает процесс его развития и совершенствования.

Общая структурная схема электропривода приведена на рис. 1.1, где утолщенными линиями показаны силовые каналы энергии, а тонкими — маломощные (информационные) электрические цепи.

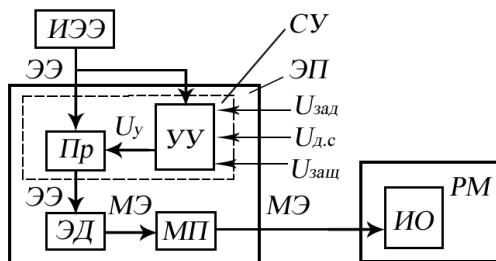


Рис. 1.1. Структурная схема электропривода

Основным элементом ЭП является электрический двигатель (ЭД), который вырабатывает механическую энергию (МЭ) за счет потребляемой от источника электроэнергии (ИЭЭ) электрической энергии (ЭЭ). В некоторых режимах работы ЭП электродвигатель осуществляет и обратное преобразование энергии, получая механическую энергию от исполнительных органов (ИО) и работая при этом в генераторном режиме.

От электродвигателя механическая энергия подается на исполнительный орган рабочей машины (РМ) через механическую передачу (МП). В некоторых случаях ИО непосредственно соединяется с ЭД, что соответствует безредукторному ЭП.

Электрическая энергия поступает в ЭП от источника электроэнергии через преобразователь электрической энергии (Пр).

Функции управления и автоматизации работы ЭП осуществляются устройством управления (УУ). Это устройство вырабатывает сигнал управления  $U_y$  с использованием сигнала задания (уставки)  $U_{\text{зад}}$ , задающего характер движения исполнительного органа, дополнительных сигналов  $U_{\text{д.с.}}$  (сигналов обратных связей), дающих информацию о ходе технологического процесса, характере движения исполнительного органа и работе отдельных элементов ЭП, а также сигналов системы защиты, блокировок и сигнализации  $U_{\text{защ}}$ . Сигналы  $U_{\text{д.с.}}$  и  $U_{\text{защ}}$  поступают от соответствующих датчиков переменных ЭП и технологического оборудования. Для преобразования этих сигналов в состав устройства управления входят устройства сопряжения и обработки поступающей информации. Преобразователь П вместе с устройством управления УУ образуют систему управления (СУ) электропривода.

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

Назначение указанных на рис. 1.1 элементов состоит в следующем.

Электродвигатель — электромеханический преобразователь, предназначенный для преобразования

электрической энергии в механическую (в некоторых режимах работы ЭП — для обратного преобразования энергии).

*Преобразователь электроэнергии* — электротехническое устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии одних параметров или показателей в электроэнергию других параметров или показателей и управления процессом преобразования энергии.

*Механическая передача* — механический преобразователь, предназначенный для передачи механической энергии от электродвигателя к исполнительному органу рабочей машины и согласования вида и скоростей их движения.

*Управляющее устройство* — совокупность элементов и устройств, предназначенная для формирования управляющих воздействий в ЭП и обеспечивающая взаимодействие ЭП с сопредельными системами его отдельных частей.

*Система управления ЭП* — совокупность преобразователя электроэнергии и устройства управления, предназначенная для управления электромеханическим преобразованием энергии в целях обеспечения заданного движения исполнительного органа рабочей машины.

*Рабочая машина* — машина, осуществляющая изменение формы, свойств, состояния и положения предметов труда.

*Исполнительный орган рабочей машины* — движущийся элемент рабочей машины, выполняющий технологическую операцию.

В табл. 1.1 приведены наиболее распространенные примеры реализации элементов ЭП.

ЭП классифицируются по числу используемых электродвигателей, характеру движения, типам электродвигателя и силового преобразователя, структурам и технической реализации систем управления, наличию или отсутствию механической передачи и т.д. Выделим наиболее важные ее составляющие.

Таблица 1.1

## Реализация элементов ЭП

Название	Обозначение на схеме	Возможные виды
Электродвигатель	ЭД	Двигатели постоянного тока с различным возбуждением, асинхронные и синхронные двигатели, шаговый двигатель, вентильный двигатель, двигатели с катящимися и волновыми роторами, редукторные двигатели
Преобразователь электроэнергии	П	Выпрямитель, преобразователь частоты, регуляторы напряжения постоянного и переменного тока, инверторы, импульсные преобразователи напряжения
Механическая передача	МП	Редуктор, волновая передача, передача винт—гайка, реечная передача, цепная и ременная передачи, кривошипно-шатунный механизм
Устройство управления	УУ	Регулятор, микропроцессорные средства управления, программируемый контроллер, релейная схема, устройства памяти, логические устройства, драйверы, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи (ЦАП, АЦП), датчики переменных ЭП и технологического процесса

***По соотношению числа двигателей и исполнительных органов рабочих машин различают:***

- групповой ЭП, обеспечивающий движение исполнительного органа нескольких рабочих машин или

движение нескольких исполнительных органов одной рабочей машины;

- индивидуальный ЭП, обеспечивающий движение одного исполнительного органа одной рабочей машины;
- взаимосвязанный ЭП, состоящий из двух или более двигателей или механически связанных между собой ЭП, при работе которых поддерживается заданное соотношение их скоростей и (или) нагрузок, и (или) положения исполнительных органов рабочих машин.

При наличии механической связи между ЭП взаимосвязанный ЭП называется многодвигательным, при наличии электрической связи — электрическим валом.

***По характеру движения исполнительных органов рабочих машин различают:***

- ЭП вращательного движения, обеспечивающий вращательное движение исполнительных органов рабочих машин;
- ЭП поступательного движения, обеспечивающий поступательное движение исполнительных органов рабочих машин;
- ЭП возвратно-поступательного движения, обеспечивающий возвратно-поступательное (вибрационное) движение исполнительных органов рабочих машин;
- ЭП непрерывного движения, обеспечивающий непрерывное движение исполнительных органов рабочих машин;
- ЭП дискретного движения, обеспечивающий дискретное перемещение исполнительных органов рабочих машин;
- реверсивный ЭП, обеспечивающий движение исполнительных органов рабочих машин в любом из двух противоположных направлений;
- нереверсивный ЭП, обеспечивающий движение исполнительных органов рабочих машин только в одном направлении;



- многокоординатный ЭП, обеспечивающий движение исполнительных органов рабочих машин по двум или более пространственным координатам;
- моментный ЭП, обеспечивающий заданный момент или усилие на исполнительных органах рабочих машин;
- позиционный ЭП, обеспечивающий перемещение и установку исполнительных органов рабочих машин в заданное положение;
- многоскоростной ЭП, обеспечивающий движение исполнительных органов рабочих машин с любой из двух или более фиксированных скоростей;
- регулируемый ЭП, обеспечивающий управляемое изменение координат движения исполнительных органов рабочих машин;
- нерегулируемый ЭП, не обеспечивающий управляемое изменение координат движения исполнительных органов рабочих машин;
- ЭП согласованного движения, обеспечивающий согласованное движение двух или более исполнительных органов рабочих машин.

***По характеру и структуре системы управления различают:***

- неавтоматизированные ЭП, операции по управлению которыми выполняет оператор;
- автоматизированные ЭП, все или часть операций управления в которых выполняют устройства управления;
- следящие ЭП, обеспечивающие перемещение исполнительных органов рабочих машин в соответствии с произвольно изменяющимся входным задающим сигналом;
- ЭП с программным управлением, обеспечивающие перемещение исполнительных органов рабочих машин в соответствии с заданной программой;
- адаптивные ЭП, автоматически избирающие структуру и (или) параметры своей системы управления при изменении возмущающих воздействий;

- ЭП с регулированием энергетических показателей, обеспечивающие заданный закон изменения одного или нескольких энергетических показателей работы;

- ЭП с разомкнутой (замкнутой) системой управления, в которых отсутствуют (имеются) обратные связи по регулируемым координатам и (или) возмущающему воздействию.

***По технической (аппаратной) реализации элементов ЭП различают:***

- ЭП постоянного (переменного) тока, содержащие двигатели постоянного (переменного) тока;

- тиристорные (транзисторные) ЭП, содержащие тиристорные (транзисторные) преобразователи электроэнергии;

- система «генератор—двигатель» (система «статический преобразователь—двигатель») — ЭП, в состав которых входят электромашинные (статические) преобразователи электроэнергии;

- ЭП с релейно-контакторным (бесконтактным) управлением, система управления которыми реализована на основе релейно-контакторной (бесконтактной) аппаратуры;

- ЭП с мехатронным модулем, объединяющим двигатель с электронными и электромеханическими компонентами управления, диагностики и защиты;

- редукторные (безредукторные) ЭП, механическая передача которых содержит (не содержит) редуктор;

- маховичные ЭП, механическая передача которых содержит маховик;

- дифференциальные ЭП, представляющие собой многодвигательные ЭП, в которых скорость и момент двигателей алгебраически суммируются с помощью механического дифференциала;

- ЭП с тормозным устройством (управляемой муфтой), механическая передача которых содержит тормозное устройство (управляемую муфту).

## 1.2. Структуры электроприводов

В зависимости от выполняемых функций, вида и числа регулируемых переменных и степени автоматизации технологических процессов реализация ЭП, которая иллюстрируется рис. 1.2, может быть самой разнообразной.

Все ЭП можно разделить на две группы: неавтоматизированные и автоматизированные. *Неавтоматизированные* — это электроприводы, управление которыми выполняет человек (оператор). Он с помощью простых средств управления осуществляет пуск, остановку ЭП и изменение скорости в соответствии с заданным технологическим циклом. Для помощи оператору ЭП снабжен элементами защиты, блокировок и сигнализации.

В *автоматизированном* электроприводе большинство операций управления выполняются системой управления (см. рис. 1.2). На оператора возлагаются функции по включению и отключению ЭП и общему контролю над его работой.

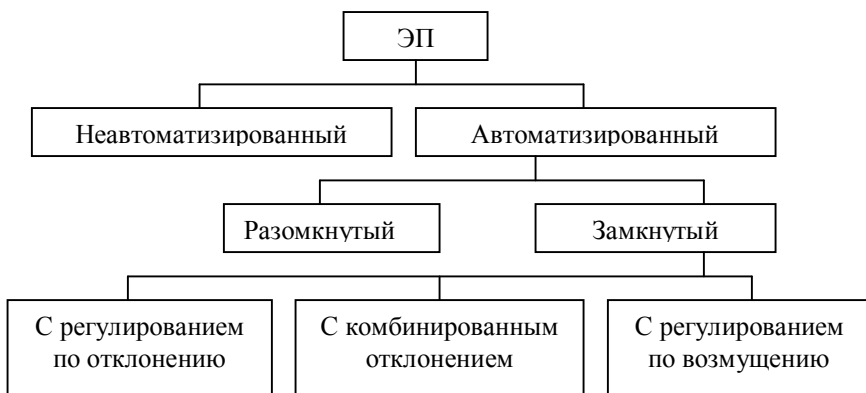


Рис. 1.2. Классификация электроприводов по степени их автоматизации

Функционирование автоматизированного ЭП является более эффективным и экономически целесообразным, так как позволяет освободить человека от утомительного и

однообразного труда, повысить производительность рабочих машин и механизмов и качество выполняемых ими технологических процессов и операций.

Автоматизированные ЭП подразделяются, в свою очередь, еще на две группы: разомкнутые и замкнутые. Работа разомкнутого электропривода характеризуется тем, что все внешние возмущения (для ЭП самым характерным из них является момент нагрузки  $M_c$ ) влияют на выходную переменную ЭП, например, на его скорость. Другими словами, разомкнутый ЭП не отстранен от влияния внешних возмущений, все изменения которых отражаются на его работе. В разомкнутом ЭП по этой причине невозможно обеспечить высокое качество регулирования переменных, хотя он отличается простой схемой.

### **Контрольные вопросы**

1. Приведите свои примеры рабочих машин и их исполнительных органов, реализующих технологические процессы и операции.
2. Каковы особенности функционирования исполнительных органов рабочих машин?
3. Каковы преимущества электрического привода?
4. Как классифицируются электрические приводы?

## 2. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Силковую часть ЭП образуют устройства, по которым проходит основной поток электрической и механической энергии. К ним относятся электродвигатели, коммутационные электрические аппараты, преобразователи электрической и механической энергии.

### 2.1. Коммутационные электрические аппараты

К коммутационным аппаратам низкого напряжения относятся контакторы, рубильники, пакетные и автоматические выключатели, магнитные пускатели, а к аппаратам высокого напряжения — выключатели и разъединители.

*Контактор* представляет собой электромагнитный аппарат с дистанционным управлением, предназначенный для частных коммутаций силовых цепей. Контакторы различаются по:

- роду тока коммутируемой цепи (постоянного тока, переменного, постоянного и переменного токов);
- количеству главных контактов (одно-, двух- и многополюсные);
- роду тока цепи катушки (с управлением напряжением постоянного и переменного токов);
- номинальным току и напряжению коммутируемых цепей;
- конструктивному исполнению (с механическими контактами и полупроводниковые бесконтактные) и другим признакам.

*Рубильники* представляют собой простые коммутационные аппараты, предназначенные для неавтоматического нечастого замыкания и размыкания силовых электрических цепей постоянного и переменного токов. Они различаются по величине коммутируемого тока, количеству полюсов

(коммутируемых цепей), виду привода рукоятки и числу ее положений (два или три).

*Пакетные выключатели* представляют собой разновидность рубильников, отличающиеся тем, что 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.

*Автоматические выключатели* (автоматы) низкого напряжения представляют собой многоцелевой электрический аппарат и служат для нечастой коммутации электрических цепей и защиты электрических цепей и оборудования от аварийных режимов: токов короткого замыкания и перегрузки, снижения или исчезновения напряжения и изменения направления тока. Для осуществления функций защиты автоматические выключатели снабжаются расцепителями, которые при возникновении аварийных режимов приводят к их отключению.

Автоматические выключатели различаются между собой назначением, уровнями номинальных токов и напряжения, набором и исполнением применяемых защит, отключающей способностью и временем отключения. В некоторых типах автоматов предусмотрено их дистанционное отключение.

*Магнитный пускатель* представляет собой специализированный аппарат, предназначенный для пуска, останова и реверса электрических двигателей, главным образом асинхронных с короткозамкнутым ротором. Кроме управления магнитные пускатели обеспечивают с помощью тепловых реле защиту двигателей от токовых перегрузок и сигнализацию об их работе. В соответствии с перечисленными функциями в состав пускателя могут входить контактор, кнопки управления, тепловые реле защиты, сигнальные лампы, размещаемые в одном корпусе.

Выпускаемые магнитные пускатели различаются между собой 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.

Разновидностью пускателей являются так называемые полупроводниковые «мягкие» пускатели («мягкие» стартеры), позволяющие за счет снижения подводимого к двигателю напряжения уменьшать его токи при пуске. Эти устройства применяются главным образом для пуска асинхронных и синхронных двигателей средней и большой мощности.

*Контроллеры* являются многопозиционными электрическими аппаратами с ручным или ножным приводом для непосредственной коммутации силовых цепей электрических двигателей. Силовые контроллеры бывают двух видов: кулачковые и магнитные.

Кулачковые контроллеры характеризуются тем, что размыкание и замыкание их контактов обеспечивается смонтированными на барабане кулачками, поворот которых осуществляется с помощью рукоятки, маховика или педали. За счет профилирования кулачков обеспечивается необходимая последовательность коммутации контактных элементов.

Магнитные контроллеры представляют собой коммутационное устройство, в состав которого входят маломощный командоконтроллер и контакторы. Командоконтроллер с помощью своих контактов управляет катушками контакторов, которые непосредственно осуществляют коммутацию силовых цепей двигателей.

## **2.2. Преобразователи электрической энергии**

Преобразователь – это электротехническое устройство, преобразующее электроэнергию одних параметров или показателей качества в электроэнергию с другими значениями параметров или показателей качества. Параметрами электрической энергии могут являться род тока и напряжения, их частота, число фаз, фаза напряжения.

*По степени управляемости* преобразователи подразделяются на неуправляемые и управляемые. В управляемых преобразователях выходные переменные: напряжение, ток, частота — могут регулироваться.

*По элементной базе* преобразователи электроэнергии подразделяются на электромашинные (вращающиеся) и полупроводниковые (статические). Электромашинные преобразователи реализуются на основе применения электрических машин и в настоящее время находят относительно редкое применение в электроприводах. Полупроводниковые преобразователи могут быть диодными, тиристорными и транзисторными.

*По характеру преобразования* электроэнергии силовые преобразователи подразделяются на выпрямители, инверторы, преобразователи частоты, регуляторы напряжения переменного и постоянного тока, преобразователи числа фаз напряжения переменного тока.

В современных автоматизированных электроприводах применяются главным образом полупроводниковые — тиристорные и транзисторные — преобразователи постоянного и переменного тока. Достоинствами полупроводниковых преобразователей являются широкие функциональные возможности управления процессом преобразования электроэнергии, высокие быстродействие и КПД, большие сроки службы, удобство и простота обслуживания при эксплуатации, широкие возможности по реализации защит, сигнализации, диагностирования и тестирования как самого ЭП, так и технологического оборудования.

Вместе с тем, для полупроводниковых преобразователей характерны и определенные недостатки. К ним относятся: высокая чувствительность полупроводниковых приборов к перегрузкам по току, напряжению и скорости их изменения, низкая помехозащищенность, искажение синусоидальной формы тока и напряжения сети.

*Выпрямителем* называется преобразователь напряжения переменного тока в напряжение постоянного (выпрямленного)



тока. Неуправляемые выпрямители не обеспечивают регулирование напряжения на нагрузке и выполняются на полупроводниковых неуправляемых приборах односторонней проводимости — диодах. Управляемые выпрямители выполняются на управляемых диодах — тиристорах и позволяют регулировать свое выходное напряжение за счет соответствующего управления тиристорами.

Выпрямители могут быть нереверсивными и реверсивными. Реверсивные выпрямители позволяют изменять полярность выпрямленного напряжения на своей нагрузке, а нереверсивные — нет. По числу фаз питающего входного напряжения переменного тока выпрямители подразделяются на однофазные и трехфазные, а по схеме силовой части — на мостовые и с нулевым выводом.

*Инвертором* называется преобразователь напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока. Эти преобразователи используются в составе преобразователей частоты в случае питания ЭП от сети переменного тока или в виде самостоятельного преобразователя при питании ЭП от источника постоянного напряжения.

В схемах ЭП наибольшее применение нашли автономные инверторы напряжения и тока, реализуемые на тиристорах или транзисторах.

Автономные инверторы напряжения (АИН) имеют жесткую внешнюю характеристику, представляющую собой зависимость выходного напряжения от тока нагрузки, вследствие чего при изменении тока нагрузки их выходное напряжение практически не изменяется. Тем самым инвертор напряжения по отношению к нагрузке ведет себя как источник ЭДС.

Автономные инверторы тока (АИТ) имеют «мягкую» внешнюю характеристику и обладают свойствами источника тока. Тем самым инвертор тока по отношению к нагрузке ведет себя как источник тока.

*Преобразователем частоты (ПЧ)* называется преобразователь напряжения переменного тока стандартных

частоты и напряжения в напряжение переменного тока регулируемой частоты.

Полупроводниковые ПЧ подразделяются на две группы: преобразователи частоты с непосредственной связью и преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Преобразователи частоты с непосредственной связью позволяют изменять частоту напряжения на нагрузке только в сторону ее уменьшения по сравнению с частотой напряжения источника питания. Преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока не имеют подобного ограничения и находят более широкое применение в ЭП.

*Регулятором напряжения переменного тока* называется преобразователь напряжения переменного тока стандартных частоты и напряжения в регулируемое напряжение переменного тока той же частоты. Они могут быть одно- и трехфазными и используют в своей силовой части, как правило, однооперационные тиристоры.

*Регулятором напряжения постоянного тока* называется преобразователь нерегулируемого напряжения источника постоянного тока в регулируемое напряжение на нагрузке. В таких преобразователях используются силовые полупроводниковые управляемые ключи, работающие в импульсном режиме, а регулирование напряжения в них происходит за счет модуляции напряжения источника питания.

Наибольшее распространение получил широтно-импульсный способ модуляции, при котором изменяется длительность импульсов напряжения при неизменной частоте их следования.

## **2.3. Контактные устройства и элементы управления**

Они характеризуются наличием механических контактов, к ним относятся командоконтроллеры и реле, кнопки и ключи управления.

*Кнопки управления* предназначены для подачи оператором управляющего воздействия на ЭП, например, для его включения

и выключения. Они различаются по величине (нормальные и малогабаритные), числу замыкающих и размыкающих контактов, форме толкателя. Две и более кнопки, смонтированные в одном корпусе, образуют кнопочную станцию.

*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. Количество контактов ключей и диаграмма их работы могут быть самыми различными.

*Командоконтроллеры* (командоаппараты) предназначены для коммутации нескольких маломощных электрических цепей. Эти аппараты имеют ручное управление от рукоятки или педали с несколькими положениями. Командоаппараты классифицируются по числу коммутируемых цепей, виду привода контактной системы, числу рабочих положений рукоятки (педали), диаграммы включения и выключения контактов.

*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, промежуточных элементов для передачи команд из одной цепи в другую и размножения сигналов, датчиков времени, выходных элементов различных датчиков координат ЭП и технологических параметров рабочих машин и механизмов. Они выполняют самые разнообразные функции управления, контроля, защиты и блокировок в автоматизированном ЭП.

Особенность герконовых электромагнитных реле состоит в том, что их контакты герметизированы. Это повышает их износостойкость и надежность в работе.

## **Контрольные вопросы**

1. В чем сущность регулирования положения ЭП?

2. Какие виды силовых коммутационных аппаратов вы знаете?
3. Что называется преобразователем электрического тока?
4. Какие виды силовых преобразователей вы знаете?
5. Какие датчики применяются для получения информации о переменных ЭП и технологического процесса?

## 3. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 3.1. Уравнение движения электропривода

Скоростной режим электрического привода определяется при совместном рассмотрении моментов механизма  $M_c$  и двигателя  $M$  и их механических характеристик путем применения основного уравнения движения.

Вид механической характеристики двигателя  $\omega = f(M)$  зависит от его типа. Виды механических характеристик рабочих механизмов  $\omega = f(M_c)$  также отличаются разнообразием и зависят от типа статического момента (момента сопротивления движению).

*Реактивный статический момент*  $M_c$  (сила  $F_c$ ) препятствует движению и меняет свой знак при изменении направления движения.

*Активный статический момент*  $M_c$  (сила  $F_c$ ) не изменяет свой знак при изменении направления движения.

*Основное уравнение движения электропривода* для механизма, у которого все элементы имеют ту же угловую скорость ( $\omega$ ), что и ротор двигателя (насосы, вентиляторы), при суммарном моменте инерции механизма и двигателя  $J_m + J_{дв} = J_\Sigma = \text{const}$  имеет вид:

$$M = M_c + M_{дин} = M_c + J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где  $M_{дин} = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}$  — динамический момент.

Для машин, имеющих элементы, вращающиеся с другими угловыми скоростями, или элементы, движущиеся

поступательно, для применения (1) получают *приведенную механическую часть* ЭП из условия сохранения неизменной механической мощности системы.

*Приведение моментов* (обычно к валу двигателя) осуществляется с учетом потери мощности в механической передаче, поскольку механическая часть ЭП содержит подвижную часть ЭД, рабочий орган РМ и механическое ПУ. Определение приведенных к валу двигателя моментов сопротивления  $M_c$  и моментов инерции  $J_{пр}$  для активной и реактивной нагрузки рассмотрено в примерах 1 и 2.

*Продолжительность переходного процесса* пуска, перехода с одной скорости на другую и торможения привода можно определить на основе уравнения движения электропривода. Например, при разгоне со скорости  $\omega_{нач}$  до  $\omega_{уст}$  с постоянными моментами ( $J_\Sigma$ ,  $M$ ,  $M_c$ ) приближенно время переходного процесса составит

$$t_n = J_\Sigma \frac{\omega_{уст} - \omega_{нач}}{M - M_c}. \quad (2)$$

При торможении со скорости  $\omega_{нач}$  до  $\omega_{уст}$  ( $M < M_c$ , но  $M \neq 0$ ) время торможения

$$t_T = J_\Sigma \frac{\omega_{уст} - \omega_{нач}}{M + M_c}. \quad (3)$$

Из уравнения движения относительно рабочего вала по правилу определения максимума ускорения  $d\omega/dt = (i_p M - M_c) / (J_M + J_{дв} \delta i_p^2)$  можно найти оптимальное передаточное число  $i_p$  редуктора, соответствующее минимальному времени переходного процесса:

$$i_p = \frac{M_c}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_c}{M}\right)^2 + \frac{J_M}{J_{\partial\delta} \delta}}; i_p = \sqrt{\frac{J_M}{J_{\partial\delta} \delta}} \text{ при } M_c / M \ll 1, \quad (4)$$

где  $\delta$  – коэффициент, учитывающий момент инерции передачи;  
 $J_M, J_{\partial\delta}$  – моменты инерции механизма и двигателя.

**Пример 1.** Лебедка для подъема груза (рис.3.1) включает в себя барабан с канатом Б, крюк К, груз Г, редуктор Р и двигатель Д.

Данные механизма: масса груза  $m_{\Gamma} = 400$  кг; масса крюка  $m_{\kappa}=100$  кг (вес  $G_{\Gamma} = m_{\Gamma}g = 4000$  Н;  $G_{\kappa} = m_{\kappa}g=1000$  Н); скорость подъема или опускания  $v = 1$  м/с; КПД редуктора  $\eta_p = 0,5$ . Установившаяся угловая скорость двигателя  $\omega = 100$  рад/с. Момент инерции с коэффициентом  $\delta$ , учитывающим момент инерции передачи,  $J_{\text{дв}} \delta = 0,15$  кг·м<sup>2</sup>.

1. Найти приведенный к валу двигателя статический момент нагрузки  $M_{c0\uparrow}$  при подъеме крюка без груза, приведенный момент инерции крюка  $J_{\text{пр}0}$ , суммарный момент инерции,  $J_{\Sigma 0} = J_{\text{дв}} \delta + J_{\text{пр}0}$  и динамический момент  $M_{\text{дин}0\uparrow}$  привода при равномерном нарастании скорости при пуске за  $t_{\text{п}} = 1$  с.

2. Определить  $M_{c0\uparrow}$ ,  $J_{\Sigma}$  и  $M_{\text{дин}0\uparrow}$  при подъеме груза ( $\uparrow$ ).

3. Определить  $M_{c0\downarrow}$  и  $M_{\text{дин}0\downarrow}$  при опускании груза ( $\downarrow$ ).

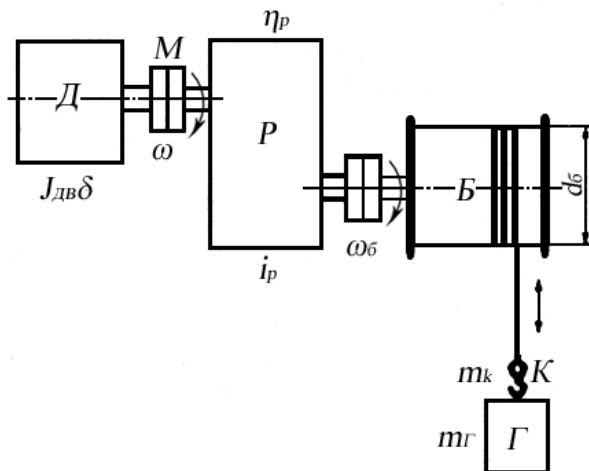


Рис.3.1. Грузоподъемная лебедка

4. Определить передаточное число редуктора  $i_p$  при диаметре барабана  $d_6 = 0,5$  м.

**Решение.** Приведенный к валу двигателя привода лебедки (рис.3.1) момент инерции тела (крюка), движущегося поступательно (подъем):

$$J_{np0} = \frac{m_k v^2}{\omega^2} = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (5)$$

Суммарный приведенный момент инерции механизма (лебедки) при подъеме крюка:

$$J_{\Sigma 0} = J_{\text{дв}} + J_{np0} = 0,16 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (6)$$

где  $\delta$  – коэффициент, учитывающий момент инерции передачи.

Статический момент, приведенный к валу двигателя, при подъеме крюка:

$$M_{c0\uparrow} = \frac{G_k v}{\omega \eta_p} = 20 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (7)$$

Динамический момент при пуске на подъем крюка без груза:

$$M_{\text{дин}0\uparrow} = J_{\Sigma 0} \frac{d\omega}{dt} = 16 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (8)$$

с постоянным ускорением:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{t_n} = 100 \text{ рад/с}^2 \quad (9)$$

Статический момент, приведенный к валу двигателя, при подъеме крюка с грузом:

$$M_{c\uparrow} = \frac{(G_k + G_r) v}{\omega \eta_p} = 100 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (10)$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции крюка с грузом:

$$J_{np} = \frac{(m_{\kappa} + m_{\Gamma})v^2}{\omega^2} = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (11)$$

Динамический момент при равномерном нарастании скорости при пуске на подъем крюка с грузом за 1 с

$$M_{\text{дин}\uparrow} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 21 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (12)$$

где  $J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} \delta + J_{\text{пр}} = 0,21 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  – суммарный момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя.

Статический момент, приведенный к валу двигателя, при спуске крюка с грузом, с учетом активного характера момента

$$M_{c\downarrow} = \frac{(G_{\kappa} + G_{\Gamma})v\eta_p}{\omega} = 25 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (13)$$

Динамический момент при равномерном снижении скорости при торможении опускаемого крюка с грузом за 1 с

$$M_{\text{дин}\downarrow} = -J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 21 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (14)$$

Установившаяся скорость барабана

$$\omega_{\delta} = \frac{2v}{d_{\delta}} = 4 \text{ рад/с} \quad (15)$$

Передаточное число редуктора

$$i_{\delta} = \frac{\omega}{\omega_{\delta}} = 25 \quad (16)$$

**Пример 2.** Механизм вращательного действия (рис. 3.2) включает в себя рабочий механизм РМ, редуктор Р и двигатель привода Д.

Данные механизма:  $M_{\text{м0}} = 20 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_{\text{м}} = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $J_{\text{м}} = 2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $i_{\text{р}} = 2,0$ ;  $\eta_{\text{р}} = 0,5$ . Двигатель характеризуется установившейся скоростью  $\omega = 100 \text{ рад/с}$  и моментом инерции  $J_{\text{дв}} \delta = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

1. Найти приведенный к валу двигателя статический момент  $M_{\text{с0}}$  при холостом ходе, момент инерции  $J_{\text{пр0}}$ , суммарный



момент инерции  $J_{\Sigma 0}$  и динамический момент привода  $M_{\text{дин}0}$  при пуске с постоянным ускорением  $\varepsilon_{\text{п}} = d\omega/dt = 50 \text{ рад/с}^2$  ( $J_{\text{м}0} = 0$ ).

2. Определить приведенный момент  $M_{\text{с}}$  при работе с нагрузкой в двигательном режиме,  $J_{\text{пр}}$ ,  $J_{\Sigma}$  и  $M_{\text{дин}}$  при  $\varepsilon_{\text{п}} = d\omega/dt = 50 \text{ рад/с}^2$ .

3. Определить  $M_{\text{с}}$ ,  $J_{\text{пр}}$ ,  $J_{\Sigma}$  и  $M_{\text{дин}}$  при торможении привода с постоянным ускорением  $\varepsilon_{\text{п}} = d\omega/dt = 50 \text{ рад/с}^2$ .

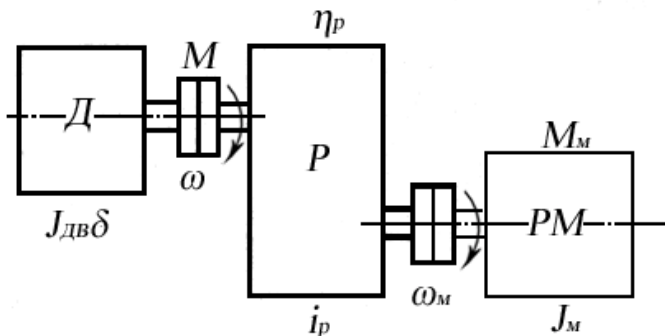


Рис.3.2. Механизм вращательного действия с редуктором

**Расчет.** Статический момент механизма вращательного действия (рис. 3.2), приведенный к валу двигателя при холостом ходе:

$$M_{\text{с}0} = \frac{M_{\text{м}0}}{i_p \eta_p}. \quad (17)$$

Динамический момент привода при холостом пуске ( $J_{\text{м}0}=0$ ) с постоянным ускорением  $\varepsilon_{\text{п}} = d\omega/dt$ :

$$M_{\text{дин}0} = J_{\Sigma 0} \frac{d\omega}{dt}, \quad (18)$$

где  $J_{\Sigma 0} = J_{\text{дв}}\delta + J_{\text{м}0}/i_p^2$  – суммарный приведенный момент инерции.

Приведенный статический момент при работе с нагрузкой, имеющей реактивный характер:

$$M_c = M'_c = \frac{M_M}{i_p \eta_p}. \quad (19)$$

Динамический момент привода при пуске под нагрузкой с постоянным ускорением  $\varepsilon_{\Pi} = d\omega/dt$

$$M_{дин} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (20)$$

где  $J_{\Sigma} = J_{дв} \delta + J_M / i_p^2$  – суммарный момент инерции;  $J_M / i_p^2$  – момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя.

Динамический момент привода при торможении с постоянным ускорением  $\varepsilon_{\Pi} = d\omega/dt = 50 \text{ рад/с}^2$

$$M_{дин} = -J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \quad (21)$$

**Пример 3.** Определить мощность двигателя привода лебедки (см. рис.3.1) в установившемся режиме работы.

Данные привода:  $G_K = 5000 \text{ Н}$ ;  $G_{\Gamma} = 15000 \text{ Н}$ ;  $v_{\downarrow} = v_{\uparrow} = 0,5 \text{ м/с}$ ; КПД редуктора  $\eta_p = 0,8$ ; КПД редуктора при работе лебедки без груза  $\eta_0 = 0,5$ .

Найти мощность двигателя: 1) при подъеме груза; 2) при подъеме крюка без груза; 3) при опускании груза; 4) при опускании крюка без груза.

**Расчет.** Мощность двигателя привода лебедки (см. рис 3.2) при подъеме груза определяется моментом  $M$  и скоростью вала двигателя  $\omega$ :

$$P_{\Gamma\uparrow} = M\omega = \frac{(G_K + G_{\Gamma})v}{\eta_p}. \quad (22)$$

Мощность двигателя при подъеме крюка

$$P_{\kappa\uparrow} = \frac{G_{\kappa}v}{\eta_0}. \quad (23)$$

Мощность двигателя привода при опускании груза, с учетом активного характера статического момента:

$$P_{\Gamma\downarrow} = (G_K + G_{\Gamma})v\eta_p. \quad (24)$$

Мощность двигателя привода при опускании крюка

$$P_{\kappa\downarrow} = G_{\kappa} v \eta_0. \quad (25)$$

**Задача 1.** Определить оптимальное передаточное число  $i_{\text{опт}}$  редуктора механизма вращательного действия (рис. 3.2) при работе на холостом ходу ( $M_m = 0$ ).

Данные привода: момент инерции механизма  $J_m = 4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ; момент инерции двигателя  $J_t = J_{\text{дв}} + J_{\text{муфты}} = J_{\text{дв}}\delta$  с учетом коэффициента влияния инерции муфты  $\delta = 1,25$ .

Найти  $i_{\text{опт}}$ ,  $J_{\text{пр}}$ : 1) для привода с двигателем  $J_{\text{дв}} = 0,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ; 2) для  $J_{\text{дв}} = 0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ; 3) для  $J_{\text{дв}} = 0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

## 3.2. Нагрузочные диаграммы и выбор мощности двигателей приводов

Для расчета мощности электропривода используются нагрузочные диаграммы и диаграмма (таходиаграмма) скорости (рис.3.3).

*Нагрузочной диаграммой рабочего механизма* называется зависимость приведенного к валу двигателя статического момента  $M_c$  от времени  $M = f(t)$ . Эта диаграмма рассчитывается на основе данных, характеризующих работу механизма.

*Нагрузочная диаграмма электропривода* – это зависимость момента, развиваемого двигателем, от времени:  $M_c + M_d = f(t)$ .

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

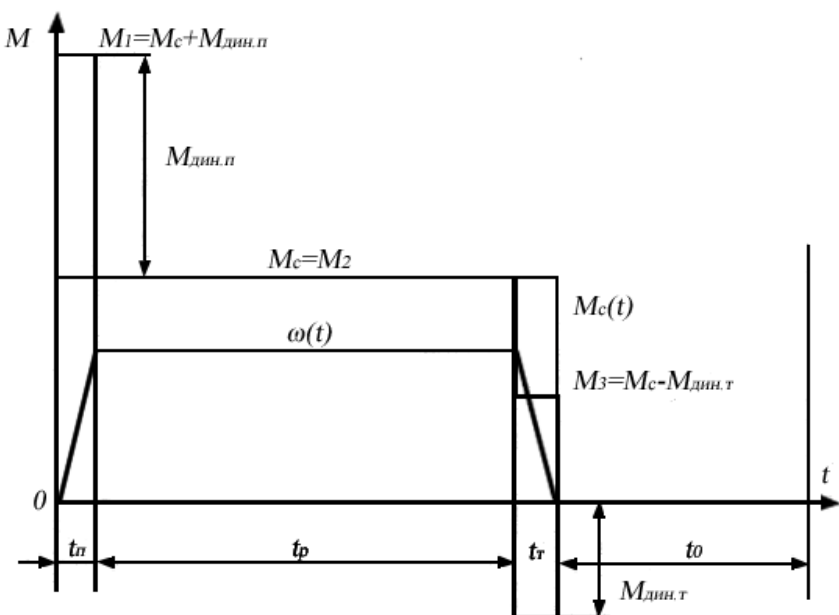


Рис. 3.3. Тахограмма и нагрузочная диаграмма рабочей машины

Расчет мощности зависит от режима работы двигателя. Различают продолжительный, повторно-кратковременный и кратковременный режимы работы.

При продолжительном и повторно-кратковременном режимах для расчета мощности двигателя используют метод эквивалентных величин (тока, момента, мощности).

*Эквивалентный ток (момент, мощность)* – это соответствующие параметры (неизменные), которые вызывают такой же нагрев двигателя, как и реальные параметры, изменяющиеся при работе.

*Повторно-кратковременный режим* характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ):

$$ПВ_x = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100, \quad (26)$$

где  $t_p$ ,  $t_0$  – время работы и время паузы.

В *кратковременном режиме* двигатель продолжительного режима может быть перегружен, и отношение допустимой мощности нагрузки двигателя в кратковременном режиме  $P_k$  к номинальной мощности  $P_n$  в продолжительном режиме характеризуется коэффициентом механической перегрузки:

$$P_M = \frac{P_k}{P_n} = \sqrt{\frac{1 + \alpha_n}{1 - e^{-t_p/T_n}}} - \alpha_n, \quad (27)$$

где  $\alpha_n = p/p_{\sim}$  – отношение постоянных потерь  $p$  к переменным потерям в двигателе  $p_{\sim}$ ;  $T_n$  – постоянная времени нагрева.

*Постоянная времени нагрева двигателя* – это время, за которое двигатель нагрелся бы до установившегося значения при условии отсутствия отдачи тепла в окружающую среду.

Зависимость между коэффициентами механической  $p_m$  и термической перегрузки  $p_t$  при пренебрежении постоянными потерями

$$P_M = \sqrt{p_t} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-t_p/T_n}}}. \quad (28)$$

**Пример 4.** Определить по заданной тахограмме и нагрузочной диаграмме рабочей машины нагрузочную диаграмму привода с предварительно выбранным двигателем. Двигатель привода имеет номинальные данные: мощность  $P_n = 50$  кВт; скорость  $\omega_n = 100$  рад/с; момент инерции двигателя с передачей  $J_{дв} \delta = 5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; момент  $M_n = P_n / \omega_n = 500$  Н·м; момент рабочей машины  $M_m = 1250$  Н·м; установившаяся скорость  $\omega_m = 20$  рад/с;  $\eta = 0,5$ .

Тахограмма рабочей машины приведена на рис.3.3. Время пуска  $t_n = 2$  с; время торможения  $t_t = 2$  с; время работы  $t_p = 26$  с и время паузы  $t_0 = 20$  с. Коэффициент ухудшения теплоотдачи в периоды пуска и торможения  $\gamma_t = 0,75$ ; коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при остановке,  $\beta_t = 0,5$ .

Рассчитать и построить нагрузочную диаграмму привода рабочей машины при  $J_m = 62,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_m = 125 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_m = 250 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

**Решение.** Момент двигателя при установившемся движении привода равен приведенному к валу двигателя моменту рабочей машины  $M_c$  (рис.3.3) с учетом формулы приведения моментов:

$$M_2 = M_c = \frac{M_m}{i_p \eta} = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (29)$$

где  $i_p = \omega_n / \omega_m = 5$  — общее передаточное число редуктора.

Момент двигателя при пуске из основного уравнения движения электропривода

$$M_1 = M_c + M_{\text{дин}} = M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 875 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (30)$$

Ускорение, согласно тахограмме:

$$d\omega/dt = \omega/t_n = 50 \text{ рад/с}^2. \quad (31)$$

Суммарный момент инерции привода равен

$$J_{\Sigma} = J_{\text{об}} \delta + \frac{J_m}{i_p^2} = 7,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (32)$$

где  $J_m/i_p^2 = 2,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  — приведенный момент инерции механизма  $J_{\text{пр}}$ . Момент двигателя при торможении равен

$$M_3 = M_c - J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = 125 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (33)$$

Замедление, согласно тахограмме:

$$d\omega/dt = \omega/t_m = 50 \text{ рад/с}^2. \quad (34)$$

Исходя из нагрузочной диаграммы, с учетом ухудшения теплообмена, эквивалентный момент двигателя:

$$M_9 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{(\gamma_t + t_p) \gamma_t + \beta_t t_0}} = 454, \quad (35)$$

где  $\gamma_t = 0,75$  — коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при пуске и торможении;  $\beta_t = 0,5$  — коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при остановке. Эквивалентная мощность:

$$P_9 = M_9 \omega = 45,4 \text{ кВт}. \quad (36)$$

Сопоставляется величина эквивалентной мощности с паспортным значением мощности выбранного двигателя:

$$P_{\text{э}} \leq P_{\text{н}} (45,4 < 50). \quad (37)$$

Двигатель проверяется по допустимой перегрузке:

$$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = \frac{M_1}{M_{\text{э}}} \leq \lambda_{\text{м}}, \quad (38)$$

где  $\lambda_{\text{м}}$  – коэффициент перегрузки по моменту выбранного двигателя  $\lambda_{\text{м}} = 1,9$ .

**Пример 5.** Привод с двигателем мощностью  $P_{\text{н}} = 28$  кВт при  $\text{ПВ}_{\text{ст}} = 25$  % предназначен для работы в повторно-кратковременном режиме. Цикл работы включает работу в течение  $t_{\text{р}} = 2,5$  мин с моментом на валу  $M = 300$  Н·м и скоростью  $\omega = 73,3$  рад/с и паузы в течение  $t_0 = 5$  мин.

Проверить правильность выбора электродвигателя.

**Расчет.** Реальная относительная продолжительность включения двигателя при работе в повторно-кратковременном режиме

$$\text{ПВ}_x = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{р}} + t_0} 100 \quad (39)$$

Мощность на валу двигателя:

$$P = M\omega. \quad (40)$$

В общем случае для определения мощности  $P_{\text{ст}}$  требуется привести реальное значение ПВ к стандартному значению  $\text{ПВ}_{\text{ст}}$ :

$$P_{\text{см}} = P \sqrt{\frac{\text{ПВ}_x}{\text{ПВ}_{\text{ст}}}}. \quad (41)$$

Выбранный двигатель должен иметь при  $\text{ПВ}_{\text{ст}}$  мощность

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{см}}. \quad (42)$$

**Пример 6.** Привод повторно-кратковременного режима работы выполнен с двигателем, имеющим следующие данные:  $P_{\text{н}} = 100$  кВт;  $\omega_{\text{н}} = 100$  рад/с;  $M_{\text{н}} = 1000$  Н·м при  $\text{ПВ}_{\text{ст}} = 60$  %.

Найти мощность  $P_{\text{н.х}}$  и номинальное значение момента  $M_{\text{н.х}}$  при работе привода с  $\text{ПВ}_{\text{ст1}} = 40$  %;  $\text{ПВ}_{\text{ст2}} = 25$  %;  $\text{ПВ}_{\text{ст3}} = 15$  %.

**Расчет.** Номинальное значение момента  $M_{н.х}$  для привода, работающего с продолжительностью включения  $ПВ_{ст.х}$  при паспортном значении двигателя  $ПВ_{ст}$ , по формуле эквивалентного момента:

$$M_{н.х} = M_n \sqrt{\frac{ПВ_{ст}}{ПВ_{ст.х}}}. \quad (43)$$

Мощность при новом значении продолжительности ПВ:

$$P_{н.х} = M_{н.х} \omega_n. \quad (44)$$

**Пример 7.** Проверить по методу эквивалентного момента двигатель привода повторно-кратковременного режима работы по нагрузочной диаграмме, приведенной на рис. 3.4.

Данные привода:  $ПВ_{ст} = 25 \%$ ;  $P_n = 2$  кВт;  $\omega_n = 100$  рад/с;  $M_n = 20$  Н·м;  $t_1 = 5$  с;  $M_1 = 25$  Н·м;  $t_2 = 10$  с;  $M_2 = 17$  Н·м;  $t_0 = 35$  с;  $t_{ц} = 50$  с.

Найти: коэффициент продолжительности включения двигателя  $ПВ_x$ ; эквивалентное значение момента двигателя при  $ПВ_x$ ; эквивалентное значение момента двигателя при  $ПВ_{ст} = 25 \%$ .

**Расчет.** Фактический коэффициент продолжительности включения двигателя при известной нагрузочной диаграмме (рис.3.4)

$$ПВ_x = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100 = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0} 100. \quad (45)$$

Эквивалентное значение момента при  $ПВ_x$

$$M_{ПВx} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2}{t_1 + t_2}}. \quad (46)$$

Если фактическая  $ПВ_x$  соответствует стандартной, то двигатель выбирают из условия  $M_n > M_{ПВx}$ .

Если фактическая  $ПВ_x$  не соответствует стандартной, эквивалентный момент приводят к стандартному (15; 25; 40; 60 %)

$$M_{cm} = M_{ПВx} \sqrt{\frac{ПВ_x}{ПВ_{cm}}}. \quad (47)$$



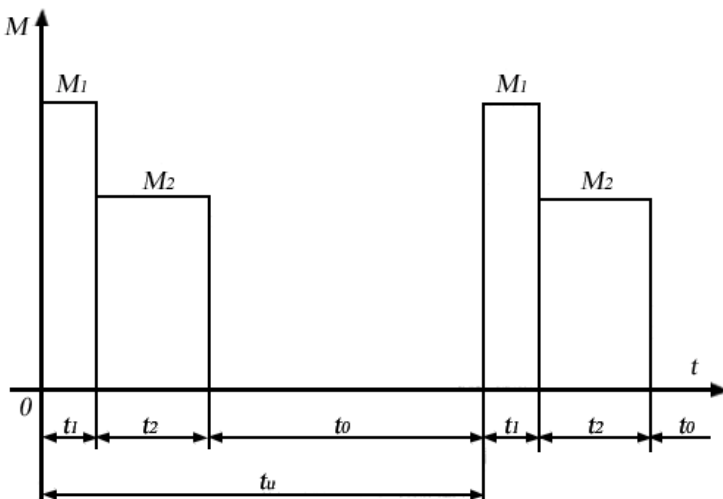


Рис 3.4. Диаграмма повторно-кратковременного режима

**Задача 2.** Привод с двигателем ( $P_n = 15$  кВт;  $\omega_n = 100$  рад/с;  $M_n = 150$  Н·м) работает по тахограмме, приведенной на рис.3.3. Коэффициент ухудшения теплоотдачи в периоды пуска и торможения  $\gamma_t = 0,75$ ; коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при остановке  $\beta_t = 0,5$ . Моменты:  $M_1 = M_n = 200$  Н·м;  $M_2 = M_p = M_c = 150$  Н·м;  $M_3 = M_T = -141$  Н·м.

Найти эквивалентный момент двигателя: при  $t_n = 5$  с;  $t_p = 40$  с;  $t_T = 5$  с;  $t_0 = 155$  с; при  $\gamma_t = 1$ ;  $\beta_t = 1$ ;  $t_0 = 75$  с.

### Контрольные вопросы

1. Какие элементы относятся к механической части ЭП?
2. Какое движение называется установившемся и какое неустановившемся?
3. Какие условия определяют установившееся и не установившееся движение?
4. Для чего выполняется операция приведения?
5. Что такое динамический момент?

## 4. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 4.1. Электромеханические свойства

#### электроприводов постоянного тока

Электромеханические свойства электропривода без обратных связей в основном определяются характеристиками двигателя. Наиболее широкое применение нашли двигатели с независимым (параллельным) возбуждением, которые и рассматриваются в пособии.

*Номинальный момент двигателя постоянного тока (ДПТ), возникающий в результате взаимодействия номинального магнитного потока  $\Phi_n$  с номинальным током якоря  $I_n$ :*

$$M_n = c\Phi_n I_n, \quad (48)$$

где  $c = p_0 N / 2\pi a$  – конструктивная постоянная двигателя при числе пар полюсов  $p_0$ , числе активных проводников якоря  $N$ , числе пар параллельных ветвей якоря  $a$ .

Для якорной цепи двигателя справедливо уравнение номинального напряжения  $U_n$ , записанное по второму закону Кирхгофа:

$$U_n = E_0 + I_n R_n, \quad (49)$$

где  $R_n$  – сопротивление всей якорной цепи, состоящей из обмоток якоря  $r_a$  и добавочного сопротивления  $R_n$ ;  $E_0$  – ЭДС обмотки якоря.

*Сопротивление обмотки якоря для двигателей средней и большой мощности оценивается по формуле*

$$r_n = 0,5 \left( 1 - \frac{P_n}{U_n I_n} \right) R_n, \quad (50)$$

где  $R_n = U_n / I_n$  – *номинальное сопротивление двигателя.*

Основные свойства двигателя постоянного тока оцениваются его скоростной (механической) характеристикой.

*Скоростная характеристика* – это зависимость скорости от тока якоря  $\omega = f(I)$  при  $U = \text{const}$  и потоке возбуждения  $\Phi = \text{const}$ :

$$\omega = \frac{U - r_{\text{я}} I}{c\Phi}. \quad (51)$$

*Естественной скоростной характеристикой* называют зависимость  $\omega = f(I)$  при номинальных значениях напряжения и потока и при отсутствии дополнительных сопротивлений цепи якоря:

$$\omega = \frac{U_n}{c\Phi_n} - \frac{r_{\text{я}} I}{c\Phi_n} = \omega_0 - \frac{r_{\text{я}} I}{c\Phi_n} = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (52)$$

Из уравнения естественной характеристики (при  $I_n$ ) получают величину, которая носит название машинная постоянная ДПТ:

$$c\Phi_n = \frac{U_n - r_{\text{я}} I_n}{\omega_n} = \frac{U}{\omega_0}. \quad (53)$$

*Номинальное значение скорости двигателя*

$$\omega_n = \omega_0 - \frac{r_{\text{я}} I_n}{c\Phi_n} \quad (54)$$

*Относительное номинальное падение скорости*

$$\Delta v_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega_n}{\omega_0}. \quad (55)$$

*Механическая характеристика* – это зависимость скорости от момента  $\omega = f(M)$  при  $U = \text{const}$  и потоке возбуждения  $\Phi = \text{const}$ :

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{Mr_{\text{я}}}{c^2\Phi^2}. \quad (56)$$

*Коэффициент крутизны*  $\beta$  является основным параметром, определяющим вид механической характеристики:

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\Delta M} \cdot \frac{M_n}{\omega_n} = \frac{1}{\gamma}, \quad (57)$$

где  $\gamma$  – коэффициент жесткости механической характеристики. Механические характеристики при  $\beta = 0$  абсолютно жесткие; при  $\beta < 0,1$  – жесткие; при  $\beta > 0,1$  – мягкие.

*Жесткость механической характеристики ДПТ*

$$\gamma^* = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{(c\Phi)^2}{R_{\text{я}}} \quad (58)$$

применяется при расчетах привода постоянного тока.

## 4.2. Естественные и искусственные характеристики

Из уравнения (51) следует, что регулировать скорость можно, изменяя сопротивление якоря  $R_{\text{я}}$ , магнитный поток  $\Phi$ , напряжение  $U$ .

Искусственная реостатная характеристика 2 при введении сопротивления в цепь якоря показана на рис.4.1 (ниже естественной характеристики 1). Реостатное регулирование с  $R_{\text{я}}$  неэкономично и используется только при пуске.

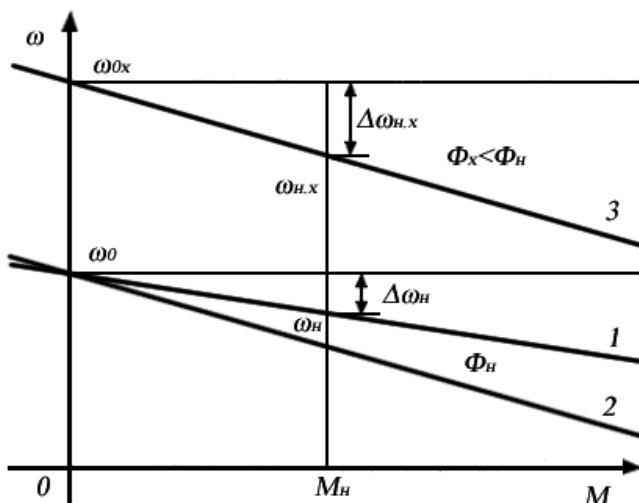


Рис. 4.1. Естественная (1) и искусственные (2, 3) механические характеристики

Регулирование изменением магнитного потока возможно только при ослаблении магнитного потока из-за насыщения магнитной системы и ограничено механической прочностью ДПТ при высоких скоростях (характеристика 3 на рис.4.1).

Скорость идеального холостого хода обратно пропорциональна коэффициенту ослабления магнитного потока  $\alpha_{\phi}$ :

$$\omega_{0x} = \frac{U_n}{\alpha_{\phi} c \Phi_n}. \quad (59)$$

*Относительное номинальное падение скорости* при номинальной нагрузке  $M_n$  и ослабленном магнитном потоке  $\alpha_{\phi} \Phi_n$

$$\Delta v_{n.x} = \frac{\Delta \omega_{n.x}}{\omega_{0x}} = \frac{r_y M_n}{\omega_{0x} (\alpha_{\phi} c \Phi_n)^2}. \quad (60)$$

Для регулирования напряжения двигателя используется генератор (система Г-Д) или статический преобразователь (ТП-Д). Система ТП-Д обеспечивает широкий диапазон регулирования  $\omega$ .

*Переходный процесс* – это процесс перехода привода из одного установившегося режима работы в другое установившееся состояние. Процесс происходит при пуске, изменении нагрузки на валу двигателя, торможении, реверсе и т.п.

*Режим динамического торможения* (ДТ) осуществляется отключением двигателя от сети и включением в цепь якоря сопротивления (двигатель работает как автономный генератор).

Режим торможения противовключением (ПВ) реализуется путем изменения на ходу полярности напряжения якоря или обмотки возбуждения ДПТ (ПВ первого рода).

*Режим рекуперативного генераторного торможения* возможен, если скорость превысит скорость холостого хода ( $\omega > \omega_0$ ).

Переходные процессы зависят от характера объекта. Если система нелинейная, проводится компьютерное моделирование. В случае линейной электромеханической системы, состоящей из ДПТ с линейной механической характеристикой и жесткого механического звена, возможен анализ процессов аналитическими методами.

Совместное решение уравнений движения электропривода (30) и механической характеристики (56) дает уравнение переходных процессов системы двигатель с линейной механической характеристикой – жесткое механическое звено, определяемых механической инерционностью электропривода:

$$\frac{J_{\Sigma} r_{я}}{(c\Phi_n)^2} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст}, \quad (61)$$

где  $\omega_{уст} = \omega_0 - (M_{\Sigma} r_{я} / (c\Phi_n)^2)$  – установившееся значение скорости электропривода после окончания переходного процесса ( $M = M_c$ ).

Решением (61) является переходная характеристика

$$\omega = \omega_{уст} - (\omega_{уст} - \omega_{нач}) \exp(-t/T_M), \quad (62)$$

где  $T_M = J_{\Sigma} r_{я} / (c\Phi_n)^2$  – электромеханическая постоянная времени;  $\omega_{нач}$  – начальная скорость.

При нулевых начальных условиях

$$\omega = \omega_{уст} (1 - \exp(-t/T_M)), \quad (63)$$

**Пример 8.** Определить ЭДС генератора, питающего цепь якоря двигателя по схеме генератор-двигатель (рис. 4.2), для получения требуемой скорости двигателя при заданной нагрузке.

Данные машин системы Г-Д: генератор:  $P_{нг} = 8,8$  кВт;  $U_{нг} = 220$  В;  $I_n = 40$  А;  $r_{яг} = 0,5$  Ом; двигатель:  $P_{нд} = 8,0$  кВт;  $\omega_n = 90$  рад/с;  $U_{нд} = U_{нг} = U_n = 220$  В;  $I_n = 40$  А;  $r_{яд} = 0,5$  Ом.

Схема и характеристики привода Г-Д приведены на рис.4.2, 4.3.

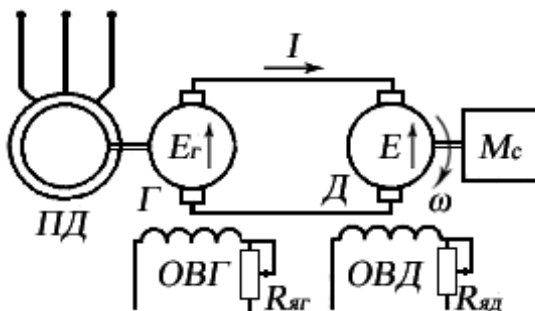


Рис.4.2. Схема электропривода по системе генератор-двигатель

1. Определить машинную постоянную двигателя  $c\Phi_n$  и скорость холостого хода двигателя  $\omega_{0гд}$  в системе Г-Д.

2. Найти номинальное значение ЭДС генератора  $E_{гн}$  для получения номинальной скорости двигателя  $\omega_{гд} = \omega_n = 90$  рад/с.

3. Найти ЭДС генератора  $E_{гх}$  для получения скорости привода в системе Г-Д  $\omega_x = 0,5\omega_n$  при  $M_{с.х} = 0,5M_n$ .

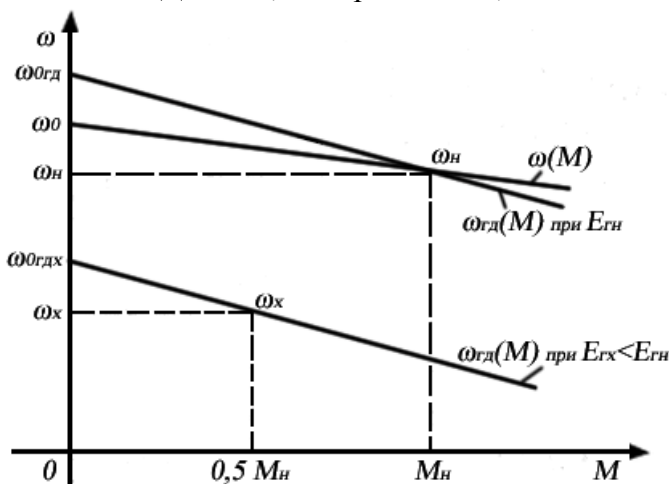


Рис.4.3. Механические характеристики электропривода Г-Д

**Решение.** Машинная постоянная двигателя при  $r_{я} = r_{яд}$

$$c\Phi_n = (U_{нд} - r_{яд} I_n) / \omega_n = 2,22 \text{ Вб.} \quad (64)$$

Падение скорости в системе Г-Д при номинальной нагрузке

$$\Delta\omega_{сдн} = \frac{I_n (r_{яд} + r_{яг})}{c\Phi_n} = 18 \text{ рад/с,} \quad (65)$$

где  $r_{яд}$ ,  $r_{яг}$  – сопротивления цепи якоря двигателя и генератора (см. рис.4.2).

Скорость холостого хода системы Г-Д при  $E_{гн}$  (см. рис. 4.3)

$$\omega_{0сд} = \Delta\omega_{сдн} + \omega_n = 108 \text{ рад/с.} \quad (66)$$

ЭДС генератора  $E_{\text{ГН}}$  для получения в системе Г-Д номинальной скорости:

$$E_{\text{ГН}} = \omega_{0\text{Д}} c\Phi_{\text{н}} = 240 \text{ В.} \quad (67)$$

ЭДС генератора для получения скорости привода  $\omega_{\text{х}} = 0,5\omega_{\text{н}}$  при  $M_{\text{с.х}} = 0,5M_{\text{н}}$ :

$$E_{\text{с.х}} = \omega_{0\text{с.х}} c\Phi_{\text{н}} = 0,5c\Phi_{\text{н}} (\omega_{\text{н}} + \Delta\omega_{\text{сДн}}) = 120 \text{ В.} \quad (68)$$

**Пример 9.** Определить ослабление магнитного потока двигателя при регулировании скорости по системе Г-Д для получения повышенной скорости привода при уменьшении нагрузки.

Данные машин системы Г-Д: генератор:  $U_{\text{нг}} = 220 \text{ В}$ ;  $I_{\text{н}} = 40 \text{ А}$ ;  $r_{\text{яг}} = 0,05 \text{ Ом}$ ; двигатель:  $\omega_{\text{н}} = 90 \text{ рад/с}$ ;  $U_{\text{нд}} = 220 \text{ В}$ ;  $I_{\text{н}} = 40 \text{ А}$ ;  $r_{\text{яд}} = 0,05 \text{ Ом}$ ; характеристики даны на рис. 4.1.

1. Найти машинную постоянную, номинальное сопротивление двигателя и абсолютное и относительное сопротивление цепи якорей системы Г-Д  $c\Phi_{\text{н}}$ ;  $R_{\text{н}}$ ;  $\rho$ .

2. Найти уменьшение относительного магнитного потока двигателя  $\varphi_{\text{х}}$  для относительной скорости привода  $v_{\text{х}} = 1,4$  при относительной нагрузке  $\mu_{\text{х}} = 0,5$ .

**Решение.** Для вычисления уменьшения относительного магнитного потока двигателя  $\varphi_{\text{х}}$  для заданной скорости и нагрузки привода используется система относительных параметров:

$$u = \frac{U}{U_{\text{н}}}, \quad v = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \mu = \frac{M}{M_{\text{н}}}, \quad \varphi = \frac{c\Phi}{c\Phi_{\text{н}}}, \quad \rho = \frac{r_{\text{я}}}{R_{\text{н}}} = 0,02, \quad (69)$$

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = 5 \text{ Ом}; \quad c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{\omega_0}.$$

где  $r_{\text{я}} = r_{\text{яд}} = r_{\text{яг}} = 0,1 \text{ Ом}$ .

Уравнение механической характеристики имеет вид (56).

В относительных единицах уравнение механической характеристики при  $U - U_{\text{н}}$ :



$$v_x = \frac{1}{\varphi_x} - \frac{\rho \mu_x}{\varphi_x^2}, \quad (70)$$

откуда уменьшение магнитного потока двигателя, учитывая решение, имеющее физический смысл ( $v_x = 1,4$ ;  $\mu_x = 0,5$ ):

$$\varphi_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_n} = \frac{1 + \sqrt{1 - 4\rho v_x \mu_x}}{2v_x} = 0,71. \quad (71)$$

**Пример 10.** Для привода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения (ДПНВ) с реостатно-релейным управлением (рис. 4.4) рассчитать величины ступеней пусковых сопротивлений. Номинальные значения параметров двигателя:  $P_n = 8,5$  кВт;  $U_n = 220$  В;  $I_n = 44$  А;  $\omega_n = 94$  рад/с. Максимальный пиковый момент двигателя при пуске  $\mu_1 = 2$ . Относительные значения момента переключения ступеней пускового сопротивления  $\mu_2 = 1$ , статического момента нагрузки  $\mu_c = 0,8$ .

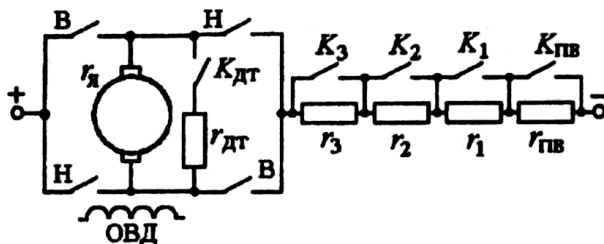


Рис. 4.4. Схема электропривода с реостатно-релейным управлением

1. Определить скорость идеального холостого хода двигателя  $\omega_0$  и построить в долях величинах естественную механическую характеристику двигателя  $v = f(\mu)$ .

2. Найти число ступеней пуска  $m$  и построить характеристики реостатного пуска (рис. 4.5).

3. Определить номинальное сопротивление двигателя  $R_n = U_n/I_n$ , сопротивление якоря  $r_я$ , найти значения ступеней  $r_1, r_2, \dots, r_m$  и полное сопротивление пускового реостата  $r_{полн}$ .

**Решение.** Для расчета величин ступеней пусковых сопротивлений (форсированный пуск) определяют следующие параметры (см. рис.4.4).

Номинальное сопротивление двигателя:

$$R_H = U_H / I_H = 5 \text{ Ом.} \quad (72)$$

Сопротивление якоря двигателя:

$$r_y = 0,5 \left( 1 - \frac{P_H}{U_H I_H} \right) R_H = 0,3 \text{ Ом.} \quad (73)$$

Скорость холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_H}{U_H - I_H r_y} \omega_H = 100 \text{ рад/с.} \quad (74)$$

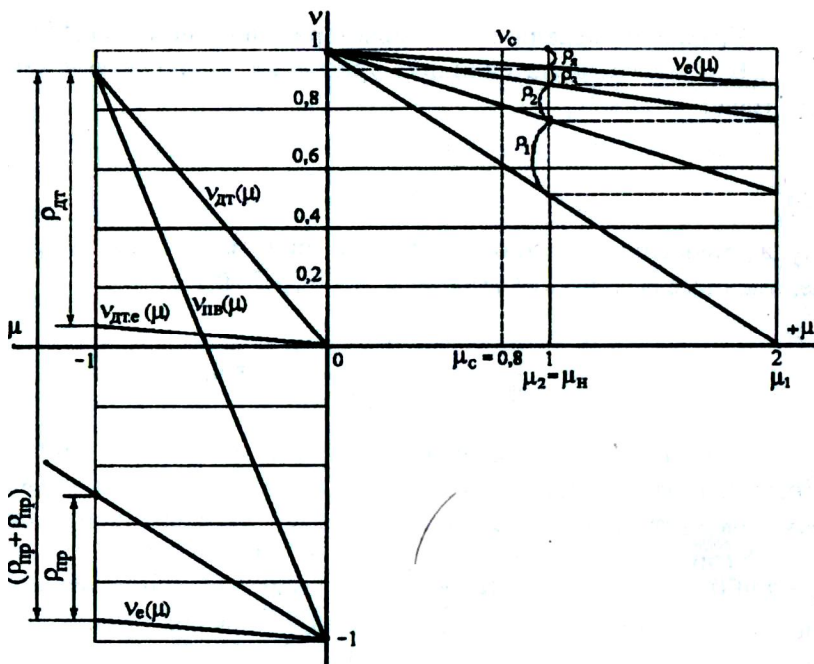


Рис. 4.5. Механические пусковые и тормозные характеристики ДПТ НВ

Машинную постоянную двигателя определяют по формуле  
(53)

$$c\Phi_n = (U_n - r_{\text{я}} I_n) / \omega_n = 2,2 \text{ Вб.} \quad (75)$$

Приближенно число ступеней реостата  $m$  при заданном значении  $\rho = r_{\text{я}} / R_n = 0,06$  находят, исходя из отношения пиковых моментов к моментам переключения:

$$\lambda = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \sqrt[m]{\frac{1}{\mu_1 \rho}} = \sqrt[3]{\frac{1}{\mu_1 \rho}} = 2,02. \quad (76)$$

При числе ступеней  $m = 3$  отношение моментов  $\lambda \sim 2$ . Следовательно, корректировку  $\mu_1, \mu_2$  при соблюдении условий  $\mu_1 = 2-2,2$ ;  $\mu_2 = 1 - 1,2 \mu_c$  можно не проводить, приняв  $\lambda = 2$ ;  $m = 3$ .

Сопротивления ступеней реостата по принятой величине  $\lambda$ :

$$r_m = r_{\text{я}} (\lambda - 1); r_{m-1} = r_m \lambda; r_{m-2} = r_{m-1} \lambda, \dots, r_1 = r_2 \lambda. \quad (77)$$

Сопротивления ступеней реостата при  $m = 3$ :

$$r_3 = r_{\text{я}} (\lambda - 1) = 0,3; r_2 = r_3 \lambda = 0,61; r_1 = r_2 \lambda = 1,22 \text{ Ом.} \quad (78)$$

Относительные сопротивления ступеней  $\rho_i = r_i / R_n$  (рис.4.5).

Полное сопротивление реостата при  $m = 3$ :

$$r_{\text{полн}} = r_1 + r_2 + r_3 = 2,13 \text{ Ом.} \quad (79)$$

Сопротивление якорной цепи:

$$r_{\text{общ}} = r_{\text{я}} + r_{\text{полн}} = 2,44 \text{ Ом.} \quad (80)$$

**Пример 11.** Для привода постоянного тока с реостатно-релейным управлением (см. рис. 4.4) рассчитать ступень сопротивления для торможения противовключением и для динамического торможения. Характеристики приведены на рис.4.5. Номинальные значения параметров двигателя:  $P_n = 8,5 \text{ кВт}$ ;  $U_n = 220 \text{ В}$ ;  $I_n = 44 \text{ А}$ ;  $r_{\text{я}} = 0,3 \text{ Ом}$ ;  $\omega_0 = 100 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_n = 94 \text{ рад/с}$ . Двигатель переключается в тормозной режим противовключением или динамического торможения при  $\mu_c = 1$  и  $v = v_n$ . Максимальный тормозной момент при переключении  $\mu_t = 1$ . Пусковые характеристики рассчитаны для максимального значения момента при пуске с  $\mu_1 = 2$ .

1. Определить номинальное сопротивление двигателя  $R_n$ , рассчитать относительное сопротивление цепи якоря  $\rho = r_{\text{я}} / R_n$  и

найти полное (без разбивки на ступени) сопротивление пуска  $\rho_{\text{полн.}}$ .

2. Построить механические характеристики двигателя  $v=f(\mu)$  в долевых величинах при переключении в режим торможения противовключением или режим динамического торможения.

3. Определить величины добавочных сопротивлений ступени противовключения и динамического торможения  $\rho_{\text{пв}}$  и  $\rho_{\text{дт}}$ .

**Расчет.** Для привода постоянного тока с реостатно-релейным управлением при расчете величин ступеней сопротивлений торможения (см. рис. 4.4) определяют следующие параметры.

Номинальное сопротивление двигателя  $R_n$  по формуле (72).

Относительное сопротивление цепи якоря:

$$\rho = \frac{r_{\text{я}}}{R_n}. \quad (81)$$

Полное сопротивление:

$$\rho_{\text{полн}} = \frac{c\Phi_n \omega_0}{\mu_1 I_n R_n}. \quad (82)$$

Величина добавочного сопротивления (см. рис.4.5) ступени динамического торможения  $r_{\text{дт}}$  и  $\rho_{\text{дт}} = r_{\text{дт}}/R_n$ ,

$$r_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{нач}}}{I_{\text{доп}}} - r_{\text{я}}, \quad (83)$$

где  $U_{\text{нач}}$  – напряжение двигателя в начальный момент торможения,  $U_{\text{нач}} \approx U_n$ ;  $I_{\text{доп}}$  – максимально допустимый ток,  $I_{\text{доп}} \approx I_n$  при  $\mu_{\text{max}} = -1$ .

Величина добавочного сопротивления ступени торможения противовключением  $r_{\text{пв}}$  и  $\rho_{\text{пв}} = r_{\text{пв}}/R_n$ :

$$r_{\text{пв}} = \frac{U_n + U_{\text{нач}}}{I_{\text{доп}}} - r_{\text{я}}. \quad (84)$$

## Контрольные вопросы

1. Какие типы двигателей постоянного тока применяются в ЭП?
2. Опишите основную схему включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
3. Назовите виды и признаки энергетических режимов двигателя.
4. Назовите основные способы регулирования координат ЭП с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением.
5. Что такое пусковая диаграмма двигателя и как она строится?
6. В чем состоят особенности схемы включения и характеристик двигателя с последовательным возбуждением?
7. Назовите способы торможения двигателем с последовательным возбуждением.

## 5. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 5.1. Электромеханические свойства

#### электроприводов переменного тока

Основным типом электродвигателя привода переменного тока является асинхронный трехфазный двигатель (АД) с короткозамкнутым или фазным ротором. При включении обмотки статора в сеть трехфазного тока в АД возникает вращающееся магнитное поле статора, угловая скорость которого определяется только числом пар полюсов  $p$  и частотой тока статора  $f_1$  и называется *синхронной скоростью*  $\omega_1 = \omega_0$ :

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}. \quad (85)$$

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС. Если роторная обмотка замкнута, то возникающий в ней ток  $I_2$  во взаимодействии с магнитным полем статора  $\Phi$  создаст вращающий момент  $M$ .

Для возникновения вращающего момента необходимо, чтобы ротор вращался со скоростью  $\omega$ , отличной от скорости поля.

Скольжение  $s$  характеризует разницу скоростей  $\omega_0$  и  $\omega$ :

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (86)$$

Связь между моментом и скольжением имеет вид

$$M = \frac{3pU_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[ (r_1 + r_2'/s)^2 + (x_2' + x_1')^2 \right]}, \quad (87)$$

где  $r_1, r_2'$  – активные сопротивления фазы статорной и роторной, приведенной к напряжению статора, обмоток;  $x_1, x_2'$  – индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора;  $U_1$  – фазное напряжение.

Зависимость  $M=f(s)$ , так же как и зависимость  $\omega=f(M)$ , называется механической характеристикой АД.

Механическая характеристика АД общего применения нелинейная и имеет максимум, характеризующийся критическими значениями момента и скольжения  $M_{кр}, s_{кр}$ . Построение характеристики затруднено, к тому же в формулу для момента входят параметры схемы замещения АД, которые в каталоге отсутствуют.

Основные параметры двигателя могут быть вычислены.

*Номинальное сопротивление* АД с фазным ротором

$$R_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3}I_{2н}}. \quad (88)$$

*Номинальный момент* АД  $M_n$  вычисляется по формуле (85).

*Критический момент* находят через коэффициент  $k_{м.к}$  перегрузки:

$$M_k = k_{м.к} M_n. \quad (89)$$

Критическое скольжение:

$$s_k = s_n \left( k_{м.к} + \sqrt{k_{м.к}^2 - 1} \right). \quad (90)$$

*Пусковой момент АДФР без сопротивления в цепи ротора:*

$$M_n = 2M_k \left/ \left( s_k + \frac{1}{s_k} \right) \right. \quad (91)$$

*Отношение пускового момента к номинальному  $\mu_{п.е} = M_n / M_n$ . Коэффициент трансформации ЭДС от статора к ротору:*

$$k_T = \frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{0,95U_{1n}}{E_{2n}} \quad (92)$$

*Приведенное сопротивление фазного ротора:*

$$r'_2 = r_2 k_T^2 = R_{2n} s_n k_T^2 \quad (93)$$

При прямом пуске АД пусковой ток характеризуется кратностью  $k_i$ :

$$I_n = k_i I_n = (4 \dots 7) I_n \quad (94)$$

*Регулирование скорости* возможно изменением числа пар полюсов, изменением скольжения за счет введения сопротивления (реактора) в цепь статора. Первый способ дает дискретное регулирование, а второй является неэкономичным и применяется при малых мощностях или при пуске АД. Наиболее перспективен частотный способ путем изменения частоты и напряжения АД.

Регулирование скорости АД с фазным ротором возможно путем введения сопротивления в цепь ротора и индуктивного сопротивления в цепь статора. Критический момент двигателя с добавочным индуктивным сопротивлением в цепи статора  $x_{1д}$ :

$$M_{к.х} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_0 \left[ \left( r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{1д} + x_2')^2} \right) \right]^*} \quad (95)$$

Критическое скольжение с добавочными сопротивлениями в цепи статора и ротора  $r_{2д}$ ,  $x_{1д}$ :

$$s_{к.х} = + (r'_2 + r'_{2д}) / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{1д} + x_2')^2} \quad (96)$$

Следовательно, скольжение  $s_{н.х}$  при номинальной нагрузке с дополнительными сопротивлениями (из формулы Клосса)

$$M_n = 2M_k \left/ \left( \frac{s_{k.x}}{s_{n.x}} + \frac{s_{n.x}}{s_{k.x}} \right) \right., \quad (97)$$

откуда

$$s_{n.x}^2 - \frac{2M_{k.x}s_{k.x}}{M_n} s_{n.x} + s_{n.x}^2 = 0. \quad (98)$$

Таким образом, скорость при включенных сопротивлениях

$$\omega_{n.x} = \omega_0(1 - s_{n.x}). \quad (99)$$

## 5.2. Естественные и искусственные характеристики

АД, как и ДПТ, может работать в трех тормозных режимах.

*Динамическое торможение* АД характеризуется тем, что статорные обмотки отключаются от сети переменного тока и подключаются к сети постоянного тока.

*Для торможения противовключением* надо поменять местами две любые фазы статора. В фазный ротор вводится сопротивление.

**Пример 12.** Для привода переменного тока центробежного насоса с трехфазным асинхронным двигателем (АД), пускаемым через реактор по схеме (рис.5.1), определить величину добавочного индуктивного сопротивления реактора  $x_p$ . Номинальные данные асинхронного двигателя:  $P_n = 26$  кВт;  $U_n = 380$  В;  $I_n = 44$  А;  $\cos\varphi_n = 0,9$ ;  $\omega_n = 100$  рад/с;  $k_i = I_p/I_n = 5$ ;  $k_{м.к} = M_k/M_n = 2$ . В режиме короткого замыкания  $\cos\varphi_{кз} = 0,6$ . Характеристики пуска показаны на рис.5.2.



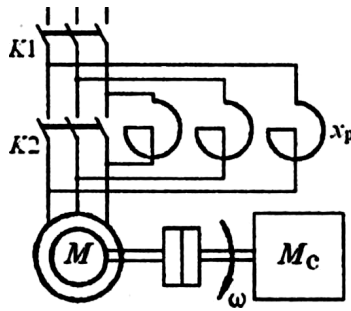


Рис. 5.1. Схема реакторного пуска АД

1. Найти полное сопротивление короткозамкнутого асинхронного двигателя  $z_{кз}$  и его активную и реактивную составляющие  $z_{кз} = r_{кз} + jx_{кз}$ .

2. Для заданного снижения пускового момента при реакторном пуске  $\mu_{п.х} = 0,5 \mu_{п.с}$  определить пусковой ток  $I_{п.х}$  и полное сопротивление  $z_{кз.х}$  короткозамкнутого двигателя при реакторном пуске.

3. Определить сопротивление реактора  $x_p$  для заданных условий пуска привода с асинхронным короткозамкнутым двигателем.

**Решение.** Определение сопротивления пускового реактора (см. рис. 5.1) начинается с расчета пускового тока асинхронного двигателя:

$$I_n = k_i \times I_n = 220 \text{ A.} \quad (100)$$

Полное сопротивление  $z_{кз} = r_{кз} + jx_{кз}$  короткозамкнутого асинхронного двигателя и его активная и реактивная составляющие:

$$\begin{aligned} z_{кз} &= \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} = 1 \text{ Ом;} \\ r_{кз} &= z_{кз} \cos \varphi_{кз} = 0,6 \text{ Ом;} \\ x_{кз} &= \sqrt{z_{кз}^2 - r_{кз}^2} = 0,8 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (101)$$

Допустимый коэффициент снижения пускового тока по заданному снижению пускового момента  $\mu_{п.х}$  ( $\mu_{п.х} = 0,5 \mu_{п.с}$ ):

$$a_T = \sqrt{\frac{\mu_{п.х}}{\mu_{п.с}}} = 0,71. \quad (102)$$

Ток при пуске с реактором в статорной цепи двигателя

$$I_{н.х} = a_T I_n = 155,6 \text{ A}. \quad (103)$$

Полное сопротивление статорной цепи асинхронного короткозамкнутого двигателя при реакторном пуске

$$z_{кз.х} = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{н.х}} = 1,41 \text{ Ом}. \quad (104)$$

Сопротивление реактора для заданных условий пуска привода с асинхронным короткозамкнутым двигателем при неизменном значении  $r_k$  (рис. 5.2):

$$x_p = \sqrt{z_{кз.х}^2 - r_{кз}^2} - x_{кз} = 0,48 \text{ Ом}. \quad (105)$$

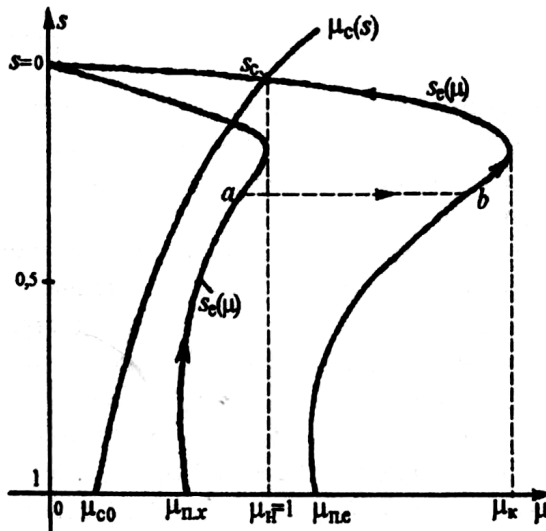


Рис. 5.2. Характеристики пуска

**Пример 13.** Для привода с асинхронным двигателем с фазным ротором и реостатно-релейным управлением (рис.5.3) построить статические характеристики реостатного пуска и рассчитать ступени пускового реостата (рис.5.4). Номинальные данные асинхронного двигателя привода:  $P_{\text{н}} = 22$  кВт;  $U_{\text{н}} = 380$  В;  $I_{\text{н}} = 50$  А;  $\omega_0 = 104,7$  рад/с;  $S_{\text{н}} = 0,0625^*$ ;  $k_{\text{м.к}} = M_{\text{к}}/M_{\text{н}} = 3$ ;  $\cos\varphi_{\text{н}} = 0,85$ ;  $E_{2\text{н}} = 173$  В;  $I_{2\text{н}} = 100$  А.

Двигатель пускается в три ступени ( $m=3$ ) с максимальным моментом при пуске  $\mu_1 = 2$  и минимальным  $\mu_2 = 1$ . Для динамического торможения (ДТ) двигателя обмотки статора подключаются к сети через трансформатор Т и выпрямитель V.

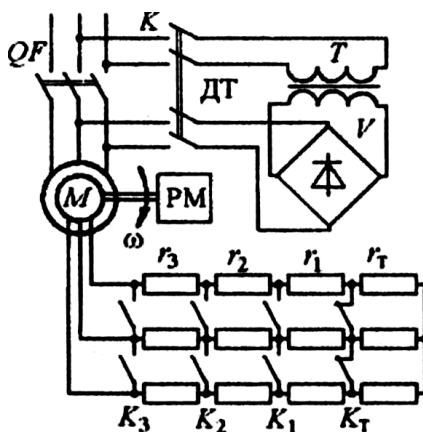


Рис. 5.3. Схема реостатно-релейного пуска и торможения АДФР

1. Определить при  $r_{1s} \approx 0$ : сопротивление ротора  $r_{2p}$  при  $S = S_{\text{н}}$ , полное сопротивление пускового реостата  $r_{1+m}$  при  $S_{\text{п}} = 1$  и коэффициент отношения моментов двигателя при реостатном пуске  $\lambda = \mu_1/\mu_2$ .

2. Рассчитать приближенным аналитическим методом ступени пускового реостата  $R_1, R_2, R_3$  при  $m = 3, \lambda = 2$ .

3. Построить график линейных пусковых характеристик асинхронного привода при найденных значениях моментов пе-

реключения  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и относительных сопротивлений ступеней пускового реостата  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ .

**Расчет.** Вычисление пусковых сопротивлений (см. рис.5.3) приближенным методом основано на прямолинейности рабочей части механических характеристик АД и аналогичен расчету для двигателя постоянного тока при  $\rho_t = s_t$  (рис. 5.4).

Номинальное сопротивление асинхронного двигателя с фазным ротором  $R_{2H}$  вычисляют по формуле (88).

Активное сопротивление ротора:

$$r_{2p} = \frac{E_{2H} s_H}{\sqrt{3} I_{2H}}. \quad (106)$$

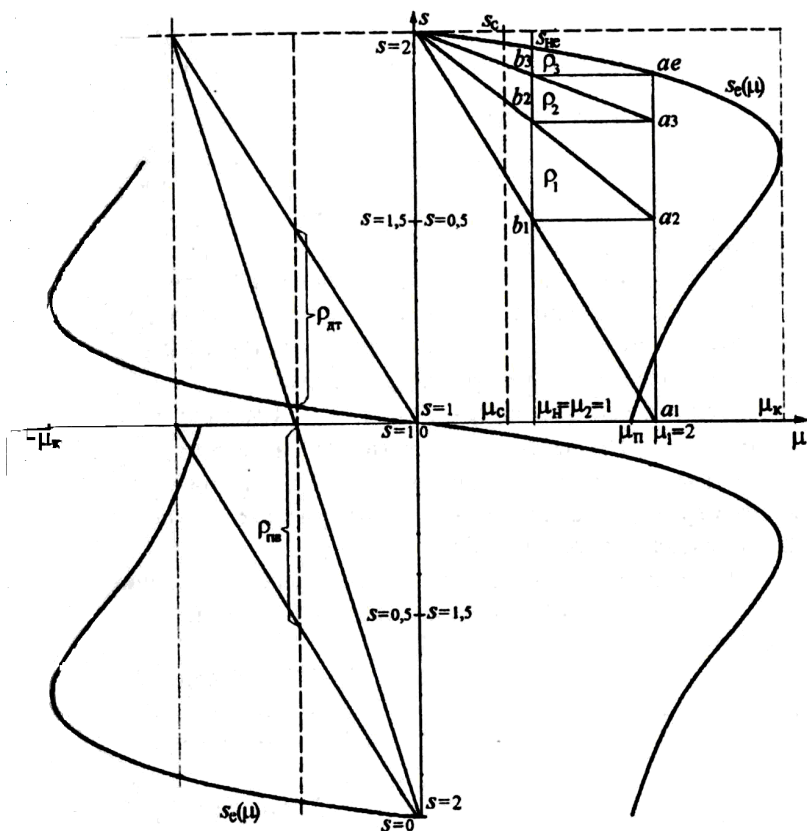


Рис. 5.4. Механические пусковые и тормозные характеристики АДФР

Относительное значение сопротивления фазы ротора:

$$\rho = \frac{r_{2p}}{R_{2н}}. \quad (107)$$

При заданном числе ступеней  $m$  по формуле (76) проверяют отношение пиков моментов к моментам переключения  $\lambda = \mu_1 / \mu_2$ .

Сопротивления ступеней реостата:

$$r_m = r_{2p}(\lambda - 1); r_{m-1} = r_m \lambda; r_{m-2} = r_{m-1} \lambda, \dots, r_1 = r_2 \lambda. \quad (108)$$

Сопротивления ступеней реостата при  $m = 3$ :

$$r_3 = r_{2p}(\lambda - 1); r_2 = r_3 \lambda; r_1 = r_2 \lambda. \quad (109)$$

Полное сопротивление роторной цепи:

$$r_{н.р} = r_1 + r_2 + r_3 = \frac{E_{2н}(1 - 2s_n)}{\sqrt{3}I_{2н}\mu_1}. \quad (110)$$

Значения относительных сопротивлений ступеней пускового реостата ( $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ ):

$$\rho_i = \frac{r_i}{R_{2н}}. \quad (111)$$

Критическое скольжение  $s_k$  для естественной характеристики находят из уравнения (90).

## Контрольные вопросы

1. Какие основные части составляют конструкцию асинхронного двигателя?
2. Что такое схема замещения асинхронного двигателя?
3. Какие достоинства и недостатки имеет способ регулирования переменных асинхронного двигателя с помощью резисторов?
4. Какие возможности по управлению двигателем имеет способ, связанный с регулированием напряжения на его секторе?

5. В чем состоит сущность регулирования скорости двигателя, за счет изменения частоты питающего напряжения?
6. С какой целью при частотном способе производится также и регулирование подводимого к двигателю напряжения?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алексеев В.В.* Электрический привод / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук. – М.: Академия, 2008. – 199 с.
2. *Браславский И.Я.* Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / И.Я. Браславский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
3. *Епифанов А.П.* Основы электропривода – СПб.: «Лань», 2008. – 192 с.
4. *Ильинский Н.Ф.* Общий курс электропривода: учеб. для студентов вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 714 с.
5. *Москаленко В.В.* Автоматизированный электропривод: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 324 с.
6. *Сандлер А.С.* Частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1966. – 144 с.
7. *Чилилин М.Г.* Общий курс электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ .....	4
1.1. Классификация электроприводов.....	4
1.2. Структуры электроприводов .....	11
2. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ .....	13
2.1. Коммутационные электрические аппараты .....	13
2.2. Преобразователи электрической энергии .....	15
2.3. Контактные устройства и элементы управления.....	18
3. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	20
3.1. Уравнение движения электропривода .....	20
3.2. Нагрузочные диаграммы и выбор мощности двигателей приводов.....	27
4. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	34
4.1. Электромеханические свойства электроприводов постоянного тока .....	34
4.2. Естественные и искусственные характеристики .....	36
5. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	45
5.1. Электромеханические свойства электроприводов переменного тока.....	45
5.2. Естественные и искусственные характеристики .....	48
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	54

Составители:  
Кузнецов Андрей Юрьевич

Болотов Денис Сергеевич

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Практикум

Редактор Н.К. Крупина  
Компьютерная верстка

Подписано к печати 2017 г.  
Объем 1,8 уч.-изд.л., усл. печ. л. 3,5 Формат 60×841/16  
Тираж 10 экз. Изд. № Заказ №

Отпечатано в издательстве Новосибирского ГАУ  
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160