

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных
месторождений и транспорт нефти»

В. В. Логвин

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

ПОСОБИЕ

**по одноименной дисциплине
для слушателей специальности 1-70 05 75
«Трубопроводный транспорт, хранение
и реализация нефтегазопродуктов»
заочной формы обучения**

Гомель 2015

УДК 62-83(075.8)
ББК 31.291я73
Л69

*Рекомендовано кафедрой «Разработка нефтяных месторождений
и транспорт нефти» ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 01.09.2015 г.)*

Рецензент: доц. кафедры «Теоретические основы электротехники»
ГГТУ им. П. О. Сухого *А. В. Козлов*

Логвин, В. В.

Л69 Электроприводы и электрооборудование : пособие по одной дисциплине для слушателей специальности 1-70 05 75 «Трубопроводный транспорт, хранение и реализация нефтегазопродуктов» заоч. формы обучения / В. В. Логвин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 89 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Пособие предназначено для овладения теоретическими знаниями по расчету параметров и характеристик электроприводов рабочих машин, для приобретения навыков по правильному выбору показателей и исполнения электрооборудования.

Для слушателей специальности 1-70 05 75 «Трубопроводный транспорт, хранение и реализация нефтегазопродуктов» заочной формы обучения ИПК и П.

**УДК 62-83(075.8)
ББК 31.291я73**

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1	5
Лекция 1.	
1.1. Электропривод как отрасли науки и техники	5
1.2. Принципы построения систем управления автоматизированным электроприводом	7
Лекция 2.	
1.3. Классификация систем управления АЭП	11
Раздел 2.	15
Лекция 3.	
2.1. Приведение моментов и сил сопротивления, момен- инерции	15
Лекция 4.	
2.2. Уравнение движения электропривода	18
Лекция 5.	
2.3. Механические характеристики двигателя постоянно- тока независимого возбуждения. Двигательный режим	22
Лекция 6.	
2.4. Механические характеристики двигателя постоянно- тока независимого возбуждения. Режим электрического можения.	28
Лекция 7.	
2.5. Механические характеристики двигателя постоянно- тока последовательного возбуждения. Двигательный сим.	37
Лекция 8.	
2.6. Механические характеристики двигателя постоянно- тока последовательного возбуждения. Режим электри- ческого торможения.	41
Лекция 9.	
2.7. Механические характеристики асинхронных двига- ей. Двигательный режим.	45

Лекция 10.	
2.8. Механические характеристики асинхронных двигателей. Режим электрического торможения.	49
Лекция 11.	
2.9. Механические и электрические характеристики синхронных двигателей.	57
Раздел 3.	62
Лекция 12.	
3.1. Принципы автоматического управления пуском и торможением двигателей.	62
Лекция 13.	
3.2. Типовые узлы схем автоматического управления ком ДПТ.	66
Лекция 14.	
3.3. Типовые узлы схем автоматического управления торможением ДПТ.	71
Лекция 15.	
3.4. Типовые узлы схем автоматического управления ком двигателей переменного тока.	78
Лекция 16.	
3.5. Типовые узлы схем автоматического управления торможением двигателей переменного тока.	83
Лекция 17.	
3.6. Узлы электрической защиты двигателей и схем управления.	86

Раздел 1

Лекция 1

1.1. Электропривод как отрасли науки и техники

Нефтегазовая промышленность характеризуется высокой энергоемкостью. Энергозатраты, необходимые для обеспечения процессов сооружения скважин, добычи углеводородного сырья, транспорта и хранения, переработки нефти и газа, имеет устойчивую тенденцию к росту. Большая часть электроэнергии преобразуется в механическую в электроприводах. С каждым годом установленная мощность электродвигателей - основной части электроприводов - увеличивается.

Нефтегазовая промышленность, а особенно электробурение, являются весьма энергоемкими отраслями, причем основной объем электроэнергии потребляют привод буровых насосов и лебедок. Значительный рост стоимости электроэнергии, получаемой от источников централизованного электроснабжения, и стоимости линий электропередачи, а также наметившиеся тенденции перехода к автономному энергоснабжению с источниками ограниченной установленной мощности выводят на первый план задачи энергосбережения.

Основные направления развития электропривода технологических установок нефтяной и газовой промышленности совпадают с общей тенденцией развития электропривода на современном этапе - все более широким применением регулируемого электропривода и компьютерных средств автоматизации при создании нового и модернизации действующего технологического оборудования. Следует также отметить специфическое для нефтяной и газовой промышленности направление дальнейшего совершенствования электропривода – повышение надежности и взрывозащищенности.

Электропривод – устройство, состоящее из трёх существенно различных частей: двигателя (Д), механического передаточного устройства (МПУ) и технологической машины (ТМ).

Назначение двигателя: преобразование энергии различных видов в механическую энергию. МПУ предназначено для передачи механической энергии (МЭ), от двигателя к ТМ. Оно не влияет на количество передаваемой МЭ (без учёта потерь), но может изменять её параметры и для согласования видов движения выполняется в виде ременной, цепной, зубчатой или других механических передач.

В технологической машине МЭ используется для изменения свойств, состояния, формы или положения обрабатываемого материала или изделия.

В современных приводах в качестве источника МЭ используются различные электрические двигатели (ЭД). Они преобразуют электрическую энергию (ЭЭ) в механическую и поэтому привод получил название электропривода (ЭП). Его функциональная схема приведена на рис. 1.1. В её состав, кроме названных элементов, входит управляемый преобразователь (П), с помощью которого ЭЭ от сети подаётся к ЭД.

Изменяя сигнал управления преобразователем U_y , можно изменять количество ЭЭ, поступающей от сети к ЭД. В результате этого будет изменяться количество МЭ, вырабатываемой двигателем и получаемой ТМ. Это, в свою очередь, приведёт к изменению технологического процесса, эффективность которого характеризуется регулируемой величиной $y(t)$.

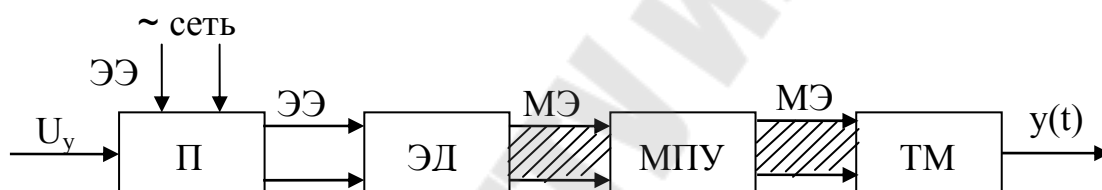


Рис. 1.1 - Функциональная схема электропривода

В настоящее время в ведущих отраслях промышленности отношение установленной мощности электроприводов к общей установленной мощности приводов с двигателями всех видов (тепловых, гидравлических, пневматических) приближается к 100 %. Это определяется тем, что ЭД изготавливаются на разнообразные мощности (от сотых долей ватта до десятков тысяч киловатт) и скорости вращения (от долей оборота вала в минуту до нескольких сотен тысяч оборотов в минуту); ЭП работает в среде агрессивных жидкостей и газов при низких и высоких температурах; благодаря управляемости преобразователя, ЭП легко регулирует ход технологического процесса, обеспечивая различные параметры движения рабочих органов ТМ; он обладает высоким к.п.д., надёжен в эксплуатации и не загрязняет окружающую среду.

1.2. Принципы построения систем управления автоматизированным электроприводом

Отличительной особенностью современного электропривода является то, что в нём сигнал управления преобразователем U_y формируется специальным автоматическим управляющим устройством (АУУ) без непосредственного участия человека. Такое управление называют автоматическим, а электропривод – автоматизированным (АЭП).

Систему управления АЭП, как и любую другую систему автоматического управления, можно рассматривать как систему, воспринимающую и перерабатывающую информацию.

В первом канале формируется информация о требуемом значении регулируемой величины $q(t)$ (задающее воздействие).

Во втором канале с помощью датчиков может быть получена информация о действительном значении регулируемой величины $y(t)$ или других величинах, характеризующих ЭП.

Третий канал может подавать в систему управления информацию о возмущающих воздействиях $f_i(t)$ в виде сигнала $x_i(t)$.

В зависимости от количества используемых каналов информации различают три принципа построения систем управления автоматизированным электроприводом:

- 1) принцип разомкнутого управления;
- 2) принцип замкнутого управления;
- 3) принцип комбинированного управления.

Рассмотрим функциональные схемы систем управления АЭП.

Систему управления АЭП, построенную по принципу разомкнутого управления, называют разомкнутой системой. В ней используется только один канал информации – о требуемом значении регулируемой величины $q(t)$. Функциональная схема такой системы управления приведена на рис.1.2.

В узел суммирования на входе АУУ, как и в предыдущем случае, от КО подаётся информация о $q(t)$. Стрелка, обозначающая $q(t)$, направлена в незатемнённый сектор узла суммирования. Это означает, что задающий сигнал поступает в узел суммирования со знаком «+».

Автоматическое управляющее устройство формирует сигнал управления преобразователем U_y , используя только информацию о величине задающего воздействия $q(t)$, которое на вход АУУ подаётся

от командного органа (КО). В результате того, что на каждый элемент функциональной схемы оказывают влияние возмущающие воздействия $f_i(t)$, количество поступающей к технологической машине механической энергии, а значит и ход

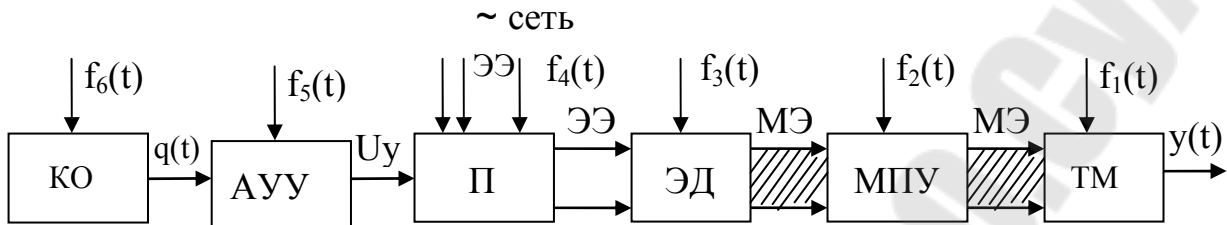


Рис. 1.2 - Функциональная схема разомкнутой системы управления АЭП

технологической операции будут изменяться. В результате этого действительное значение регулируемой величины $y(t)$ может существенно отличаться от требуемого значения $q(t)$. Разность между требуемым и действительным значением регулируемой величины в установившемся режиме (когда регулируемая величина $y(t)$ не изменяется во времени) называют ошибкой управления $\Delta x(t) = q(t) - y(t)$.

Разомкнутые системы АЭП применяются в том случае, если появление ошибки управления не приводит к существенным потерям в технологии (уменьшению производительности ТМ, снижению качества продукции и др.)

В противном случае, когда появление ошибки управления значительно снижает эффективность технологического процесса, для построения системы управления АЭП используют принцип замкнутого управления. Называют такую систему замкнутой.

В ней используются два канала информации: к информации о требуемом значении регулируемой величины $q(t)$ добавляется информация о действительном значении регулируемой величины $y(t)$. Функциональная схема такой системы управления приведена на рис.1.3.

Информация о действительном значении регулируемой величины $y(t)$ подаётся в узел суммирования с помощью главной обратной связи (ГОС). Говорят, что ГОС «замыкает» систему управления, соединяя её выход с входом.

Стрелка, обозначающая $y(t)$, направлена в затемнённый сектор узла суммирования, т.е. сигнал ГОС поступает в узел суммирования со знаком «-» и поэтому ГОС называется отрицательной обратной связью.

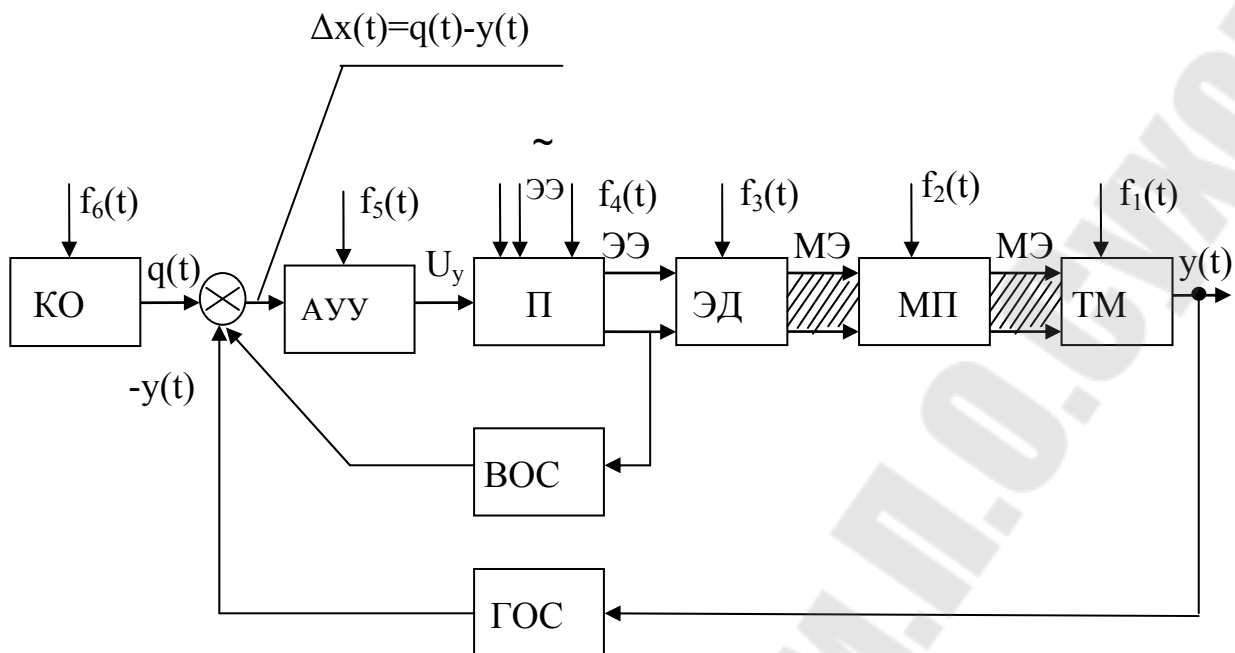


Рис. 1.3 - Функциональная схема замкнутой системы управления АЭП

В узле суммирования в результате алгебраического (с учётом знака) сложения сигналов $q(t)$ и $y(t)$ осуществляется определение величины и знака ошибки управления $\Delta x(t) = +q(t) - y(t)$. Сигнал ошибки поступает на вход АУУ. Благодаря этому АУУ, формируя сигнал управления преобразователем П на основании информации о реально существующем соотношении заданного и действительного значения регулируемой величины обеспечивает подачу к ЭД такого количества ЭЭ, а к технологической машине МЭ, что ошибка управления может быть уменьшена до допустимой величины или сведена к нулю.

Кроме ГОС, в системе управления могут быть различные внутренние по отношению к ГОС обратные связи (ВОС). Они контролируют промежуточные параметры системы, что улучшает качество процесса управления. Систему, содержащую только ГОС, называют одноконтурной, а имеющую, кроме ГОС, ещё и ВОС – многоконтурной.

В системе, построенной по комбинированному принципу, объединены две структуры – замкнутая и разомкнутая. К замкнутой системе, которая является основной, добавляется разомкнутая структура по третьему каналу информации $x_1(t)$ об основном возмущающем воздействии $f_1(t)$. Функциональная схема системы приведена на рисунке 1.4.

Основным является возмущающее воздействие, которое имеет наибольшую составляющую в величине ошибки управления.

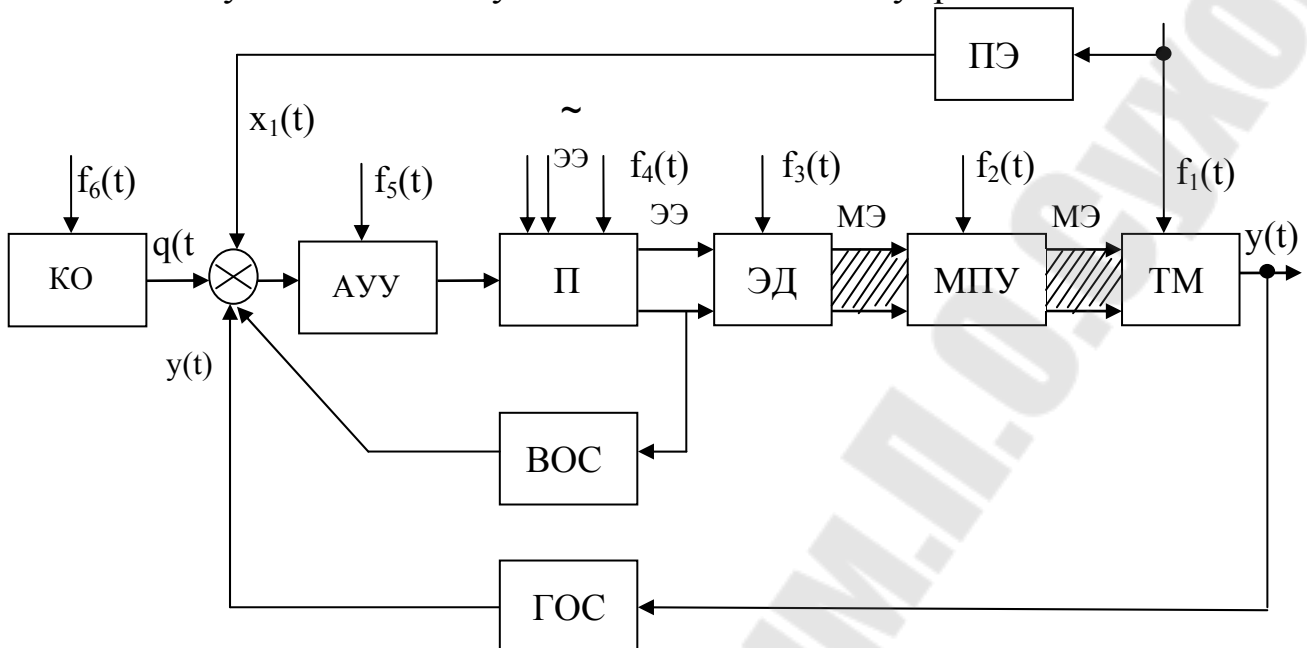


Рис. 1.4 - Функциональная схема комбинированной системы управления АЭП

На рис. 1.4 за основное, принято возмущающее воздействие $f_1(t)$. Оно контролируется промежуточным элементом (ПЭ) и информация о нём $x_1(t)$ подаётся в узел суммирования. Благодаря этому, АУУ вводит в сигнал управления преобразователем составляющую, которая компенсирует влияние $f_1(t)$ на технологический процесс и уменьшает величину ошибки управления. Влияние других возмущающих воздействий на ошибку ликвидирует основная замкнутая система.

Рассмотренные примеры позволяют дать определение понятию «автоматизированный электропривод».

Автоматизированный электропривод представляет собой электромеханическую систему, в которой, во-первых, осуществляется преобразование электрической энергии в механическую. Посредством этой энергии приводятся в движение рабочие органы технологической машины. И, во-вторых, происходит управление процессом преобразования энергии с целью обеспечения требуемых установившихся и переходных режимов работы ТМ.

Лекция 2.

1.3. Классификация систем управления АЭП

Классификация систем управления АЭП может проводиться по многим признакам: по роду тока двигателя системы разделяются на переменный и постоянный ток. По виду сигналов информации и управления – на непрерывные и дискретные системы. В зависимости от характера уравнений, описывающих процессы управления – на линейные и нелинейные системы. Часто их подразделяют по виду преобразователя или основной аппаратуры: система - генератор постоянного тока –двигатель (Г–Д); система - тиристорный преобразователь – двигатель (ТП–Д); система - тиристорный преобразователь частоты – двигатель (ТПЧ–Д) и др.

Однако наибольшее распространение получила классификация систем управления АЭП по функциям, выполняемым ими в технологических процессах. Таких функций можно выделить пять.

1. Системы управления процессами пуска, торможения, реверса. Среди них, в свою очередь, можно выделить три группы систем.

Системы первой группы разомкнутые. Применяются в электроприводах с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Преобразователь состоит из силового переключающего устройства (СПУ), подключающего двигатель непосредственно к сети. Вся аппаратура управления – релейного действия (контактная или бесконтактная).

Системы управления второй группы выполняются также разомкнутыми. Они применяются в электроприводах с двигателями постоянного тока и асинхронными двигателями с фазным ротором, имеют более сложную структуру СПУ, обеспечивающих ступенчатое переключение резисторов или других элементов в силовых цепях двигателя. Обеспечивают управление автоматическим пуском и торможением, при котором ограничиваются ток и момент двигателя. При ручном управлении СПУ возможно регулирование скорости в малом диапазоне.

Системы третьей группы предназначены для осуществления оптимальных процессов пуска, торможения, реверса. Под оптимальными в данном случае понимают переходные процессы, протекающие за минимальное время. Это обеспечивается поддержанием в процессе

пуска и торможения величины вращающего момента двигателя на уровне допустимого значения.

Применяются такие системы в электроприводах с повторно-кратковременным режимом работы, когда время установившегося режима мало, либо вовсе отсутствует. Поэтому появление ошибки управления не будет приводить к потерям в технологии и система может не иметь ГОС.

Замкнутый контур регулирования в такой системе образуется отрицательной обратной связью по моменту (току) двигателя. На рис.1.4 она показана как ВОС. Регулируемой величиной в данном случае становится момент двигателя. Поэтому АУУ формирует сигнал управления П таким образом, чтобы в процессе пуска и торможения момент поддерживался на требуемом уровне или изменялся во времени по необходимому закону.

2. Системы поддержания постоянным заданного значения регулируемой величины (системы стабилизации). Регулируемыми являются величины, характеризующие движение рабочего органа ТМ и вала двигателя – скорость, ускорение, момент, мощность и др.

Системы стабилизации построены по замкнутому принципу и могут иметь функциональную схему, приведенную на рис.1.4. В такой системе задающий сигнал $q(t)=const$. Поэтому уменьшение регулируемой величины $y(t)$, вызванное появлением возмущающего воздействия $f_i(t)$, будет приводить к увеличению сигнала ошибки управления на входе АУУ. Автоматическое управляющее устройство формирует сигнал управления преобразователем в зависимости от применяемого в нём закона управления (типа регулятора). При пропорциональном законе управления в качестве регулятора используется пропорциональное (усилительное) звено с коэффициентом усиления большим единицы (П – регулятор). Поэтому при увеличении сигнала ошибка на входе П – регулятора будет увеличиваться и сигнал управления преобразователем. В результате этого будет увеличиваться количество ЭЭ и МЭ, что приведёт к увеличению $y(t)$ и уменьшению ошибки управления. Однако она не может быть компенсирована полностью, так как в этом случае сигналы на входе и выходе П – регулятора будут равны нулю, к двигателю не будет подаваться ЭЭ и технологический процесс остановится.

Систему стабилизации, в которой ошибка управления не сводится к нулю, а только лишь уменьшается до допустимой величины, называют статической.

При пропорционально – интегральном законе управления регулятор состоит из двух включённых параллельно звеньев – пропорционального и интегрального (П-И – регулятор). Сигнал ошибки поступает одновременно на вход обоих звеньев. Пропорциональная часть регулятора, как и в предыдущем случае, будет усиливать сигнал ошибки. Интегральная часть регулятора сигнал ошибки будет суммировать, т.е. её выходной сигнал будет увеличиваться до тех пор, пока на входе регулятора имеется сигнал ошибки. Поскольку выходной сигнал регулятора (сигнал управления преобразователем) является суммой выходных сигналов пропорциональной и интегральной частей, то до тех пор, пока на входе регулятора будет сигнал ошибки, его выходной сигнал будет увеличиваться. В результате этого будет увеличиваться количество ЭЭ и МЭ в системе и уменьшаться ошибка управления. Когда сигнал ошибки на входе регулятора станет равным нулю, сигнал на выходе регулятора будет больше нуля, благодаря тому, что интегральная часть регулятора после исчезновения сигнала на её входе запоминает суммарное значение выходного сигнала. К двигателю будет подаваться ЭЭ и технологический процесс будет продолжаться.

Систему стабилизации, в которой ошибка управления сводится к нулю, называют астатической.

При пропорционально – интегрально – дифференциальном законе управления параллельно П, И. – звеньям включают дифференцирующее звено (П – И – Д – регулятор).

Выходной сигнал дифференциальной части прямопропорционален скорости изменения сигнала ошибки управления. Суммируясь с сигналами П, И частей регулятора, он дополнительно увеличивает сигнал управления преобразователем и количество ЭЭ, поступающей к двигателю. Это способствует уменьшению динамической ошибки управления, т.е. разности между требуемым и действительным значением регулируемой величины во время переходного режима в системе.

Применяются системы стабилизации в случаях необходимости особо точного поддержания какого-либо параметра техпроцесса, а также при регулировании скорости двигателя в большом диапазоне.

Для формирования процессов пуска и торможения система стабилизации может иметь внутреннюю обратную связь по моменту двигателя (ВОС на рис. 1.4).

Разомкнутый канал управления по основному возмущающему воздействию уменьшает ошибку управления в статических системах.

3. Следящие системы. Как и системы стабилизации построены по замкнутому принципу. Однако задающий сигнал $q(t)$ в них изменяется по случайному закону и действительное значение регулируемой величины $y(t)$ должно повторять (отслеживать) этот закон.

Применяются в технологических машинах, которые требуют, чтобы при повороте входного вала на любой угол выходной вал «следил» за входным и поворачивался на такой же угол.

Когда положение валов совпадает $q(t) = y(t)$ и ошибка управления равна нулю. При изменении положения входного вала $q(t) \neq y(t)$. На входе АУУ появляется сигнал ошибки, преобразователь подаёт ЭЭ на двигатель и выходной вал будет вращаться до тех пор, пока не займёт положение входного.

4. Системы программного управления. Применяются в технологических машинах, имеющих несколько электроприводов. Эти привода могут быть построены как по разомкнутому, так и по замкнутому принципу. Общим для них является устройство, изменяющее заданное значение регулируемой величины каждого электропривода по заранее заданной программе. При этом двигатели отдельных рабочих органов автоматически запускаются, работают с заданными скоростями или реверсируются, а перемещающиеся рабочие органы технологической машины не мешают друг другу.

5. Адаптивные системы. Применяются в тех случаях, когда система, построенная по замкнутому принципу, в результате непредвиденных изменений возмущающих воздействий не способна выполнить свою функцию, например, стабилизацию регулируемой величины.

Для обеспечения адаптации (приспосабливаемости) замкнутой системы в её состав вводят дополнительный контур, основу которого составляет вычислительное устройство. Оно контролирует величину $q(t)$, $y(t)$, возмущающие воздействия $f_i(t)$, анализирует работу системы стабилизации и определяет необходимые для адаптации изменения параметров или структуры АУУ.

Раздел 2

Лекция 3

2.1. Приведение моментов и сил сопротивления, моментов инерции и инерционных масс

К механической части электропривода относятся вращающаяся часть двигателя, механическое передаточное устройство и рабочий орган технологической машины.

Вращающаяся часть двигателя (якорь или ротор) служит источником механической энергии.

С помощью МПУ осуществляется преобразование вращательного движения двигателя в поступательное движение рабочего органа ТМ или за счёт изменения соотношения скоростей входного и выходного валов МПУ согласовываются скорости вращения двигателя и рабочего органа. В качестве МПУ могут использоваться цилиндрические и червячные редукторы, планетарная передача, пара винт – гайка, кривошипно-шатунная, реечная, ременная и цепная передачи.

Рабочий орган ТМ является потребителем механической энергии, которую он преобразует в полезную работу. К числу рабочих органов можно отнести шпиндель токарного или сверлильного станка, движущую часть конвейера, ковш экскаватора, кабину лифта, винт теплохода и др.

Элементы механической части ЭП связаны друг с другом и образуют кинематическую цепь, каждый элемент которой имеет свою скорость движения, характеризуется моментом инерции или инерционной массой, а также совокупностью действующих на него моментов или сил. Механическое движение любого из элементов определяется вторым законом Ньютона. Для элемента, вращающегося вокруг неподвижной оси уравнение движения имеет вид:

$$\sum \vec{M} = J \frac{d\omega}{dt},$$

где $\sum \vec{M}$ – векторная сумма моментов, действующих на элемент;

J – момент инерции элемента;

$\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение вращающегося элемента.

Для поступательно движущегося элемента уравнение движения имеет вид:

$$\sum \vec{F} = m \frac{d\upsilon}{dt},$$

где $\sum \vec{F}$ – векторная сумма сил, действующих на элемент; m – инерционная масса элемента; $\frac{d\upsilon}{dt}$ – линейное ускорение поступательно движущегося элемента.

С помощью этих уравнений может быть учтено взаимодействие любого элемента с остальной частью кинематической цепи. Это удобно осуществлять путём приведения моментов и усилий, а также моментов инерции и инерционных масс. В результате этой операции (приведения) реальная кинематическая схема заменяется расчётной, энергетически эквивалентной схемой, основу которой составляет тот элемент, движение которого рассматривается. Как правило, этим элементом является вал двигателя M . Это позволяет наиболее полно исследовать характер движения электропривода и режим его работы. Зная параметры кинематической схемы, можно определить и вид движения рабочего органа технологической машины.

Приведение моментов сопротивления от одной оси вращения к другой производится на основании баланса мощности в системе.

В ходе технологической операции рабочий орган, вращающийся на своей оси со скоростью ω_m и создающий момент сопротивления M_{cm} , потребляет мощность $P_m = M_{cm} \omega_m$. Потери мощности в МПУ учитываются делением величины P_m на к.п.д. передачи η_n . Эту мощность обеспечивает двигатель, вращающийся со скоростью ω и развивающий момент M_c , равный приведенному к оси вращения вала двигателя моменту сопротивления M_{cm} . На основании равенства мощностей получим:

$$\frac{M_{cm} \omega_m}{\eta_n} = M_c \omega.$$

Тогда выражение для определения приведенного момента сопротивления M_c имеет вид:

$$M_c = \frac{M_{cm} \omega_m}{\eta_n \omega} = \frac{M_{cm}}{\eta_n i},$$

где $i = \frac{\omega}{\omega_m}$ – передаточное число МПУ.

Приведение сил сопротивления производится аналогично. Если скорость поступательного движения рабочего органа ТМ равна v_m и в

ходе технологической операции создаётся сила сопротивления $F_{см}$, то с учётом к.п.д. МПУ уравнение баланса мощностей будет иметь вид:

$$\frac{F_{см} v_M}{\eta_{п}} = M_c \omega.$$

Приведенный момент сопротивления M_c будет равен:

$$M_c = \frac{F_{см} v_M}{\eta_{п} \omega} = \frac{F_{см}}{\eta_{п} \rho},$$

где $\rho = \frac{\omega}{v_M}$ – радиус приведения МПУ.

Каждый из вращающихся элементов кинематической схемы характеризуется моментом инерции J_i . Приведение моментов инерции к одной оси вращения основано на том, что суммарный запас кинетической энергии движущихся частей привода, отнесённый к одной оси, остаётся неизменным. При наличии вращающихся частей, обладающих моментами инерции $J_0, J_1, J_2, \dots, J_n$ и угловыми скоростями $\omega, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ можно заменить их динамическое действие действием одного элемента, обладающего моментом инерции J и вращающегося со скоростью ω .

В таком случае можно записать уравнение баланса кинетической энергии:

$$J \frac{\omega^2}{2} = J_0 \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2}.$$

Суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя будет равен:

$$J = J_0 + J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega} \right)^2 + \dots + \left(J_n \frac{\omega_n^2}{\omega} \right)^2,$$

где J_0 – момент инерции ротора (якоря) М;

J_1, J_2, \dots, J_n – моменты инерции остальных элементов кинематической схемы.

Приведение инерционных масс m , движущихся поступательно, осуществляется также на основании равенства кинетической энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = J \frac{\omega^2}{2},$$

отсюда момент инерции, приведённый к валу двигателя будет равен:

$$J = m \left(\frac{v}{\omega} \right)^2.$$

В результате выполнения операций приведения реальная кинематическая схема заменяется расчётной, энергетически эквивалентной схемой. Она представляет собой тело, вращающееся на неподвижной оси. Этой осью является ось вращения вала двигателя. На него действуют вращающий момент двигателя M и приведенный момент сопротивления M_c . Вращается тело со скоростью двигателя ω и обладает приведенным моментом инерции J .

В теории электропривода такая расчётная схема получила название одномассовой механической системы. Она соответствует механической части АЭП с абсолютно жёсткими элементами и без зазоров.

Лекция 4

2.2. Уравнение движения электропривода

Уравнение движения одномассовой механической системы в теории электропривода получило название уравнения движения электропривода.

В общей форме записи оно имеет вид:

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

где $\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение одномассовой системы.

В уравнении движения «+» ставится в том случае, когда направление M или M_c совпадает с направлением скорости вращения ω , а знак «-», когда они направлены противоположно.

Знак «+» перед M соответствует двигательному режиму работы электрического привода: двигатель преобразовывает ЭЭ в МЭ, развивает вращающий момент M и вращает одномассовую систему в направлении вращающего момента.

Знак «-» перед M соответствует режиму электрического торможения. Для перевода в этот режим работающего электропривода схема его включения или её параметры изменяется таким образом, что изменяется на противоположное направление вращающего момента M . А., поскольку направление вращения сохраняется под действием инерционных сил, вращающий момент двигателя начинает тормозить движение одномассовой системы. Двигатель переходит в

генераторный режим работы. Он забирает запасённую в механической части привода МЭ, снижая тем самым скорость вращения, преобразовывает её в ЭЭ и либо возвращает ЭЭ в сеть, либо она расходуется на нагрев двигателя.

Знак «+» перед M_c говорит о том, что M_c способствует вращению.

Знак «-» говорит о том, что препятствует.

Все моменты сопротивления можно разделить на две категории: 1- реактивные M_c ; 2 – активные или потенциальные M_c .

В первую категорию входят моменты сопротивления, появление которых связано с необходимостью преодолевать трение. Они всегда препятствуют движению электропривода и изменяют свой знак при изменении направления вращения.

Во вторую категорию входят моменты от силы тяжести, а также от растяжения, сжатия или скручивания упругих тел. Они связаны с изменением потенциальной энергии отдельных элементов кинематической схемы. Поэтому они могут как препятствовать, так и способствовать движению, не изменяя своего знака при изменении направления вращения.

Правая часть уравнения движения носит название динамического момента M_d и проявляется только во время переходных режимов.

При $M_d > 0$ и $\frac{d\omega}{dt} > 0$, т.е. имеет место ускорение механической части

привода. При $M_d < 0$ и $\frac{d\omega}{dt} < 0$ имеет место замедление. При $M = M_c$,

$M_d = 0$ и $\frac{d\omega}{dt} = 0$ т.е. в данном случае привод работает в установившемся режиме, т.е. механическая часть вращается с постоянной скоростью.

На примере электропривода подъёмной лебёдки можно рассмотреть все четыре формы записи уравнения движения электропривода.

В первом случае электропривод включён в направлении подъёма груза. Двигатель работает в двигательном режиме. Груз, подвешенный на крюке, создаёт момент сопротивления, препятствующий вращению. Тогда уравнение движения будет иметь вид:

$$+M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Во втором случае в конце подъёма груза двигатель переводится в режим электрического торможения и его момент, как и момент сопротивления, будет препятствовать вращению. Уравнение движения в этом случае имеет вид:

$$-M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}.$$

В третьем случае электропривод включён в направлении опускания груза, т.е. двигатель работает в двигательном режиме. Поскольку момент сопротивления, создаваемый поднятым грузом, является активным, то при опускании груза он будет не препятствовать, а способствовать вращению. Уравнение движения имеет вид:

$$+M + M_C = J \frac{d\omega}{dt}.$$

В четвёртом случае в конце опускания груза двигатель опять переводится в режим электрического торможения, а момент сопротивления продолжает вращать двигатель в направлении спуска. В этом случае уравнение движения имеет вид:

$$-M + M_C = J \frac{d\omega}{dt}.$$

При ускорении или замедлении электропривод работает в переходном режиме, вид которого полностью определяется законом изменения динамического момента M_d . Последний, являясь функцией вращающего момента M и момента сопротивления M_C , может зависеть от скорости, времени или положения рабочего органа ТМ.

При исследовании переходного режима находят зависимости $M(t)$, $\omega(t)$ а также длительность переходного режима. Последнее представляет особый интерес, так как время ускорения и замедления могут существенно влиять на производительность механизма.

Определение времени работы электропривода в переходном режиме основано на интегрировании уравнения движения электропривода.

Для режима пуска, когда имеет место ускорение привода, уравнение движения электропривода имеет вид:

$$+M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Разделив переменные уравнения, получим:

$$dt = J \frac{d\omega}{M - M_C}.$$

Тогда время, необходимое для увеличения скорости от ω_1 до ω_2 , $t_{1,2}$ можно найти, проинтегрировав последние уравнения:

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J \frac{d\omega}{M - M_c}.$$

Для решения этого интеграла необходимо знать зависимости моментов двигателя и механизма от скорости. Такие зависимости $\omega=f(M)$ и $\omega=f(M_c)$ называются механическими характеристиками соответственно двигателя и технологической машины.

Механическую характеристику всех ТМ можно разделить на четыре категории: 1– величина M_c не зависит от скорости. Такой характеристикой обладают подъёмные механизмы, конвейеры с постоянной массой перемещаемого материала, а также все механизмы, у которых основным моментом сопротивления является момент трения; 2 – M_c линейно возрастает с ростом скорости. Такую характеристику имеет генератор постоянного тока с независимым возбуждением; 3 – M_c нелинейно возрастает с ростом нагрузки. Такую характеристику имеет вентилятор, гребной винт корабля, центробежный насос; 4 – M_c нелинейно убывает с возрастанием скорости. Такой характеристикой обладают некоторые металлорежущие станки.

Механические характеристики двигателей подробно будут рассматриваться в дальнейшем. Однако, если пуск двигателя происходит в системе с обратной связью по моменту, то момент двигателя не зависит от скорости.

Приняв M и M_c не зависящими от скорости величинами, получаем простейший случай решения интеграла. Величина времени разгона $t_{1,2}$ будет равна:

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

Для режима электрического торможения, когда имеет место замедление привода, уравнение движения имеет вид:

$$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Разделив переменные, получим:

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

Время, необходимое для уменьшения скорости от ω_2 до ω_1 $t_{2,1}$, будет равно:

$$t_{2,1} = \int_{\omega_2}^{\omega_1} J \frac{d\omega}{-(M + M_c)}.$$

Знак « \leftarrow » из подынтегрального выражения можно убрать, поменяв местами пределы интегрирования. Получим:

$$t_{2,1} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J \frac{d\omega}{M + M_c}.$$

При $M = \text{const}$, $M_c = \text{const}$ время торможения будет равно:

$$t_{2,1} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M + M_c}.$$

Если величины M и M_c находятся в сложной зависимости от скорости, то уравнение движения аналитически не решается. Необходимо использовать приближённые методы решения.

Лекция 5

2.3. Механические характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения. Двигательный режим

Электрический двигатель, в отличие от двигателей других типов, способен сам автоматически разогнаться до скорости установившегося режима работы, снижать скорость при увеличении момента сопротивления и из установившегося режима с большей скоростью переходить в установившийся режим с меньшей скоростью, увеличивать скорость при уменьшении момента сопротивления и переходить из установившегося режима с меньшей скоростью к установившемуся режиму с большей скоростью. Эта особенность электрического двигателя объясняется тем, что между скоростью вращения и вращающим моментом двигателя существует зависимость $\omega = f(M)$, в соответствии с которой с увеличением момента скорость уменьшается и наоборот. Называют эту зависимость механической характеристикой двигателя.

С помощью механической характеристики можно определить основные свойства электрического двигателя и проверить их соответствие требованиям технологической машины.

Оси абсцисс и ординат, по которым откладываются соответственно величины M и ω , разделяют плоскость на четыре квадрата. Первый номер принято присваивать верхнему правому квадрату, а остальные нумеровать против часовой стрелки.

В первом квадранте знаки M и ω , а значит и направление величин, совпадает. Поэтому в нём располагаются механические характеристики для двигательного режима работы электрической машины. Аналогичные характеристики для противоположного направления вращения располагаются и в третьем квадранте, так как знаки M и ω отрицательны.

Во втором квадранте скорость ω положительна, а момент M имеет отрицательный знак. Поэтому в нём располагаются механические характеристики, соответствующие режиму электрического торможения, когда под действием инерционных сил направление вращения сохраняется, а направление момента за счёт изменения схемы включения двигателя изменяется на противоположное. Аналогичные характеристики для противоположного направления вращения располагаются и в четвёртом квадранте, так как в нём ω имеет отрицательный знак, а M – положительный.

Схема включения двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением приведена на рис. 2.1.

Якорь двигателя и обмотка возбуждения LM получает питание от независимых источников напряжения U и U_g . Поэтому ток в обмотке возбуждения I_g не зависит от тока якоря I_a . Мощность источника U_g не превышает 15% от мощности источника U .

При вращающемся якоре в его обмотке наводится э.д.с. вращения E . На схеме включения двигателя направление E встречно по отношению к направлению U , что соответствует двигательному режиму работы. Величина E равна:

$$E = k\Phi\omega,$$

где ω – угловая скорость двигателя; Φ –поток двигателя;

$$k = \frac{pN}{2\pi a} \text{ – конструктивный коэффициент двигателя, данные, для}$$

расчёта которого приводятся в справочниках.

Здесь p – число пар полюсов двигателя; N – число активных проводников обмотки якоря; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

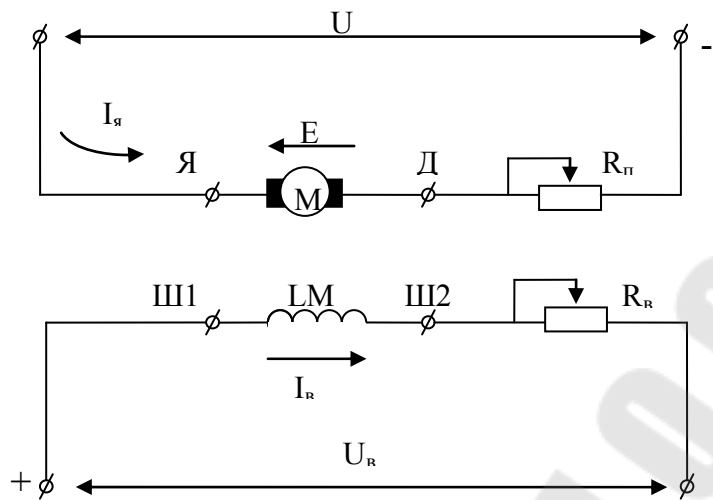


Рис. 2.1 – Схема включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Направление якорного тока I_a , как и направление E , на схеме включения показано для двигательного режима работы.

Допустимое значение якорного тока двигателя $I_{a, доп.}$ ограничивается условиями коммутации и механической прочностью якоря и не должно превышать номинальный ток $I_{a, н.}$ более чем в 2,5 раза - $I_{a, доп.} \leq 2,5 \cdot I_{a, н.}$

В соответствии с уравнением равновесия напряжений при установившемся режиме работы двигателя напряжение U , приложенное к якорной цепи двигателя, уравнивается падением напряжения в якорной цепи $I_a R_{яц}$ и наведённой в обмотке якоря э.д.с. вращения E :

$$U = I_a R_{яц} + E,$$

где $R_{яц} = R_a + R_{дп} + R_{ко} + R_{п}$ – суммарное сопротивление якорной цепи.

Здесь R_a – сопротивление обмотки якоря; $R_{дп}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов; $R_{ко}$ – сопротивление компенсационной обмотки; $R_{п}$ – сопротивление пускового реостата.

Величина I_a в установившемся режиме будет равна:

$$I_a = \frac{U - E}{R_{яц}}.$$

В режиме пуска $E=0$, поэтому из-за небольшого сопротивления обмоток пусковой ток $I_{ап}$ может превышать допустимое значение. Для

ограничения пускового тока служит пусковой реостат, сопротивление которого R_n выбирается таким образом, чтобы $I_{ЯП} \leq I_{Я.доп.}$.

$$I_{ЯП} = \frac{U}{R_{Я} + R_{ДП} + R_{КО} + R_{П}} \leq 2,5I_{ЯН}.$$

В цепи питания LM включён реостат с сопротивлением R_B . С его помощью уменьшается ток в обмотке возбуждения. В результате поток двигателя Φ ослабляется, становясь меньше номинального значения $\Phi \leq \Phi_n$.

Из уравнения равновесия напряжений для якорной цепи можно получить аналитическое выражение для механической характеристики двигателя.

Подставив в него вместо э.д.с. вращения E , её значение и решив полученное уравнение относительно скорости, получим зависимость скорости двигателя ω от тока якоря $I_{Я}$ $\omega = f(I_{Я})$, которая называется электромеханической характеристикой:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_{Я}R_{ЯЦ}}{k\Phi}.$$

Вращающий момент двигателя M связан с током якоря и магнитным потоком зависимостью $M = k\Phi I_{Я}$. Подставив в уравнение электромеханической характеристики значения для тока $I_{Я} = M/k\Phi$, получим выражение для механической характеристики $\omega = f(M)$:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{ЯЦ}}{k^2\Phi^2} \quad \text{или} \quad \omega = \frac{U}{c} - \frac{MR_{ЯЦ}}{c^2},$$

где $c = k\Phi$ – коэффициент, принимаемый постоянным и не зависящим от тока якоря, если у двигателя имеется компенсационная обмотка или если реакцию якоря не учитывать.

При неизменных параметрах U , Φ , $R_{ЯЦ}$ уравнение механической характеристики есть уравнение прямой линии.

В режиме идеального холостого хода $M_c = 0$ и $M = 0$, поскольку в установившемся режиме двигатель работает с $M = M_c$. Тогда

$$\omega = \omega_0 = \frac{U}{k\Phi},$$

где ω_0 – скорость идеального холостого хода.

При увеличении момента сопротивления скорость установившегося режима уменьшается на величину статического падения скорости $\Delta\omega_c$, которое равно:

$$\Delta\omega_c = \frac{MR_{ЯЦ}}{k^2\Phi^2}.$$

Таким образом, уравнение для механической характеристики двигателя можно записать в следующем виде:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_C.$$

Механическая характеристика двигателя, которая получается при отсутствии внешних сопротивлений в якорной цепи ($R_{\Pi}=0$) и номинальных значениях потока двигателя ($\Phi=\Phi_H$) и напряжения на якоре ($U=U_H$) называется естественной характеристикой. Следует отметить, что выполнение двух первых условий не вызывает трудностей. Третье условие ($U=U_H$) выполняется в том случае, если якорная цепь двигателя питается от источника бесконечной мощности или в замкнутой системе преобразователь-двигатель с обратной связью по напряжению преобразователя и астатическим регулятором напряжения.

Построить естественную характеристику, учитывая её линейность, можно по двум точкам – точке идеального холостого хода с координатами ($M=0; \omega=\omega_0$) и точке, соответствующей номинальному режиму работы ($M=M_H; \omega=\omega_H$). На основании паспортных данных двигателя (P_H, U_H, I_H, n_H) можно найти:

$$\omega_H = \frac{2\pi n_H}{60}; M_H = \frac{P_H}{\omega_H}; \omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H}.$$

Естественная характеристика приведена на рис. 2.2.

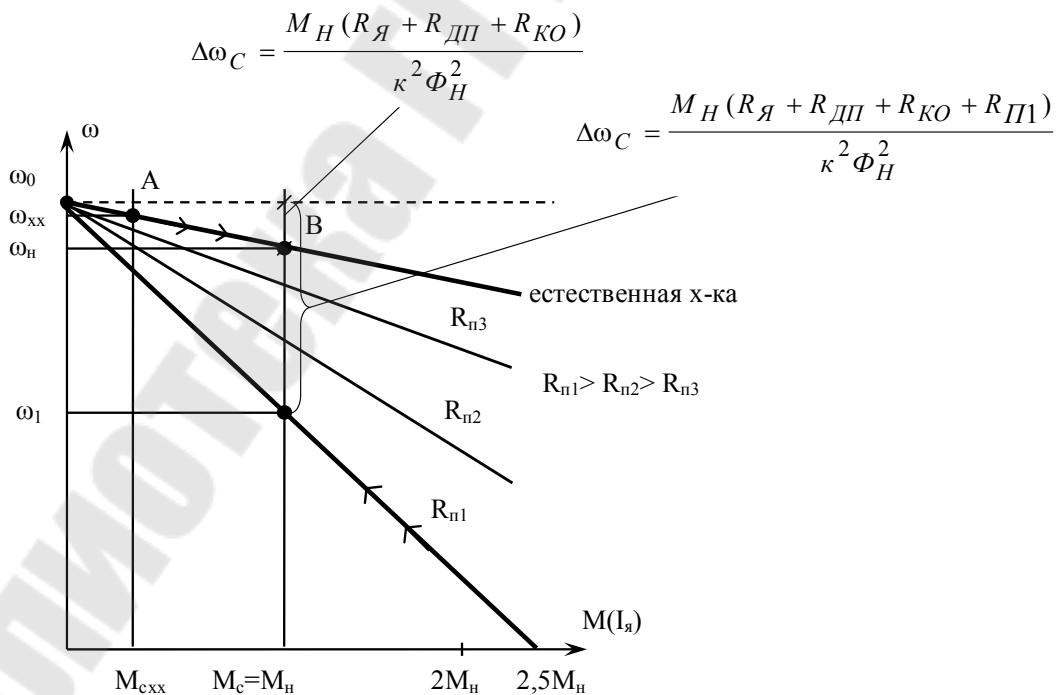


Рис. 2.2 - Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

При скорости двигателя ток $\omega = \omega_0$, $I_{Я} = 0$, так как э.д.с. вращения $E = U$ и направлена по отношению к нему встречно. Работать в двигательном режиме со скоростью $\omega = \omega_0$ двигатель не может, так как даже при отсутствии нагрузки со стороны технологической машины трение в подшипниках и крыльчатка вентилятора создают момент сопротивления холостого хода $M_{схх}$. Двигатель в установившемся режиме будет работать с $M = M_{схх}$ и $\omega = \omega_{схх} < \omega_0$. При этом $E < U$, а $I_{Я} > 0$.

Найти величину $\omega_{схх}$ можно, изобразив в одном квадрате с механической характеристикой двигателя механическую характеристику технологической машины. Если предположить, что M_c не зависит от скорости, то через точку с координатами $(\omega = 0; M = M_{схх})$ необходимо провести вертикальную прямую до её пересечения с механической характеристикой двигателя (точка A). В точке A $M = M_c$, а её проекция на ось ординат равна $\omega_{схх}$.

При увеличении момента сопротивления от $M_{схх}$ до $M_c = M_n$ появится отрицательный динамический момент $M_d < 0$ и скорость двигателя начнёт уменьшаться. Следствием этого будет уменьшение э.д.с. вращения $E = k\omega\Phi$, увеличение якорного тока $I_{Я} = (U - E)/R_{ЯЦ}$ и вращающего момента $M = kI_{Я}\Phi$. Снижение скорости и увеличение момента двигателя будет продолжаться до тех пор, пока M_d не станет равным нулю, т.е. момент двигателя M_d не станет равным $M_c = M_n$.

Благодаря тому, что в обмотке якоря наводится э.д.с. вращения E , двигатель при увеличении M_c автоматически, снизив скорость вращения и увеличив вращающий момент, перешёл из установившегося режима с большей скоростью ($\omega_{схх}$ в точке A) в установившийся режим с меньшей скоростью (ω_n в точке B).

Статически падение скорости на естественной характеристике равно:

$$\Delta\omega_c = \frac{M_n (R_{Я} + R_{ДП} + R_{КО})}{k^2 \Phi_H^2}.$$

Если сопротивление пускового реостата $R_{П} > 0$, то $\Delta\omega_c$ при одном и том же моменте двигателя будет больше, чем на естественной характеристике:

$$\Delta\omega_c = \frac{M_n (R_{Я} + R_{ДП} + R_{КО} + R_{П})}{k^2 \Phi_H^2}.$$

Поскольку величина ω_0 не зависит от величины $R_{П}$, то получаемая в этом случае характеристика, которая называется искусственной

или реостатной, будет начинаться в той же точке, что и естественная, но проходить с большим наклоном к оси абсцисс.

Якорный ток $I_{я}$ и момент двигателя M связаны прямой пропорциональной зависимостью. Поэтому ограничение с помощью R_n пускового тока значением $I_{я.дон.} \leq 2,5 I_{ян}$ автоматически ограничивает и допустимое значение пускового момента $M_{дон} \leq 2,5 M_n$. Механическая характеристика на рис. 2.2 в этом случае пересекает ось абсцисс в точке с координатами ($\omega=0$; $M=M_{дон}=2,5M_n$) и называется предельной пусковой. Реостатные характеристики, расположенные выше получаются при меньших величинах R_{II} . Запускаясь при $M_c=M_n$ по предельной пусковой характеристике, двигатель разгонится до скорости ω_1 и перейдет в установившийся режим работы. Для увеличения скорости двигателя необходимо уменьшить величину R_{II} .

Лекция 6

2.4. Механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Режим электрического торможения

Для повышения производительности технологической машины или улучшения качества продукции часто необходимо быстро и точно остановить электропривод. В начале процесса торможения, во-первых, заканчивается преобразование ЭЭ в МЭ и подача её к рабочему органу технологической машины и, во-вторых, начинается отбор МЭ, запасённой в механической части привода. В зависимости от того, куда расходуется эта энергия, можно выделить три способа торможения.

Торможение в режиме свободного выбега – запасённая МЭ расходуется на преодоление сил сопротивления. Движение рабочего органа может продолжаться ещё достаточно долго.

Механическое торможение – запасённая МЭ в механическом тормозном устройстве преобразуется в тепловую. Время торможения может быть очень небольшим, но при этом плавность торможения регулируется плохо, что приводит к появлению значительных динамических нагрузок.

Электрическое торможение – запасённая МЭ, благодаря свойству обратимости электрической машины, преобразовывается двигателем в ЭЭ и либо отдается в сеть, либо затрачивается на нагрев двигателя. Управляя процессом преобразования ЭЭ в МЭ можно обеспе-

чивать плавное торможение и ограничивать величину динамических нагрузок.

Существует три способа электрического торможения: торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное торможение), динамическое торможение и торможение противовключением.

Рекуперативное торможение возможно в том случае, когда скорость двигателя оказывается выше скорости идеального холостого хода $\omega > \omega_0$ и э.д.с. вращения становится больше напряжения якорного источника $E > U$.

В приводе подъёмной лебёдки рекуперативное торможение используется при опускании поднятого груза, который создаёт активный M_c . Двигатель включается в направлении опускания груза и в этом же направлении его раскручивает момент сопротивления. Поэтому уравнение движения электропривода будет иметь вид:

$$+M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Поскольку $M_D > 0$, скорость вращения двигателя будет увеличиваться. С увеличением ω , будет увеличиваться э.д.с. $E = k\omega\Phi$ и, как следствие, будут уменьшаться якорный ток $I_{я} = (U - E)/R_{яц}$ и момент $M = kI_{я}\Phi$.

При $\omega = \omega_0$ E будет равно U , а т.к. они направлены встречно, то $I_{я} = 0$ и $M = 0$. Уравнение движения в этом случае примет вид:

$$+M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Момент динамический остаётся положительным $M_D > 0$ и под действие активного M_c скорость вращения двигателя будет увеличиваться.

При $\omega > \omega_0$ E станет больше U и ток $I_{я}$ изменит своё направление.

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{яц}} = \frac{-(E - U)}{R_{яц}}.$$

Следовательно, изменяет направление и становится тормозным момент двигателя $M = -k\Phi I_{я}$. Уравнение движения приобретает вид:

$$-M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Когда абсолютное значение $|M|$ достигнет величины M_c , момент динамический станет равным нулю $M_D = 0$ и увеличение скорости вращения двигателя и опускания груза прекратится.

Если характеристики двигателя при подъёме груза располагаются в первом квадрате, то при опускании для двигательного режима они будут располагаться в третьем квадрате, а для режима электрического торможения – в четвёртом.

Уравнение механической характеристики в режиме рекуперативного торможения будет иметь вид:

$$-\omega = -\left(\frac{U}{k \cdot \Phi} + \frac{M \cdot R_{яв}}{k^2 \cdot \Phi^2}\right).$$

Характеристика проходит через точку $-\omega_0 = -U/k\Phi$. Наклон её определяется множителем второго слагаемого $R_{яв}/k^2\Phi^2$, который по абсолютному значению при заданном сопротивлении $R_{яв}$ остаётся неизменным. Следовательно, наклон механической характеристики будет таким же, как и в двигательном режиме, и она является продолжением характеристик для двигательного режима из III квадрата в IV. Характеристики приведены на рис. 2.3.

При работе двигателя на естественной характеристике увеличение скорости опускания груза прекратится при скорости $(-\omega_1)$, а на реостатной – $(-\omega_2)$.

В режиме рекуперативного торможения двигатель работает как генератор, включённый параллельно с сетью. Он преобразовывает МЭ в ЭЭ и отдает её в сеть.

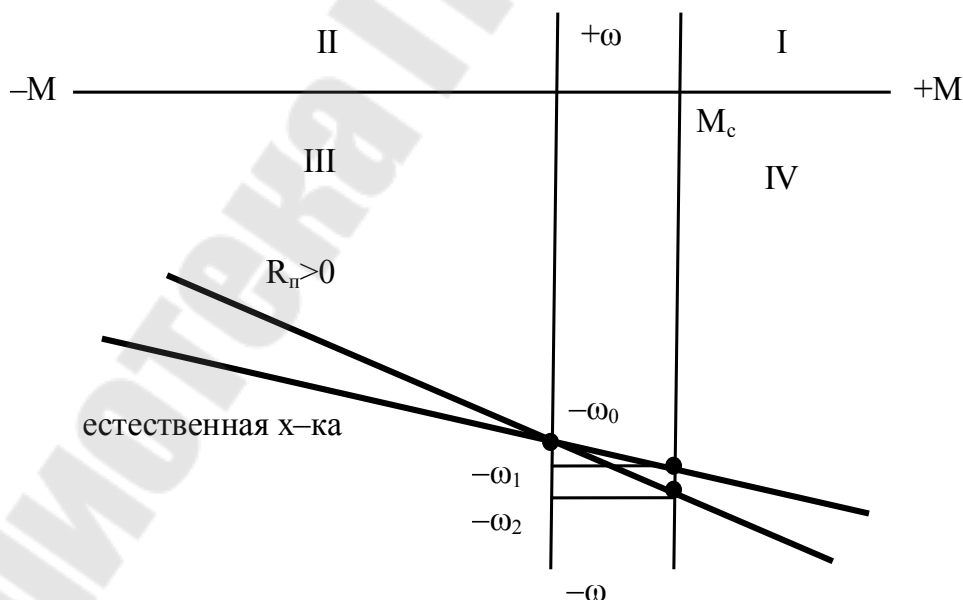


Рис. 2.3 - Характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в режиме рекуперативного торможения

Динамическое торможение. Для перевода работающего двигателя в режим динамического торможения якорная цепь отключается от источника якорного напряжения и на зажимы якоря подключается реостат динамического торможения $R_{ДТ}$. Схема включения двигателя приведена на рис.2.4а.

Под действием инерционных сил якорь продолжает вращаться в прежнем направлении, а полярность напряжения U_6 , прикладываемого к обмотке возбуждения, не изменяется. Следовательно, сохраняет своё направление э.д.с. вращения E . В образовавшемся контуре ток $I_я$ будет протекать под действием E . Поскольку E направлено встречно U , то и направление тока по отношению к двигательному режиму изменится на противоположное:

$$I_{яДТ} = -\frac{E}{R_я + R_{ДП} + R_{КО} + R_{ДТ}}.$$

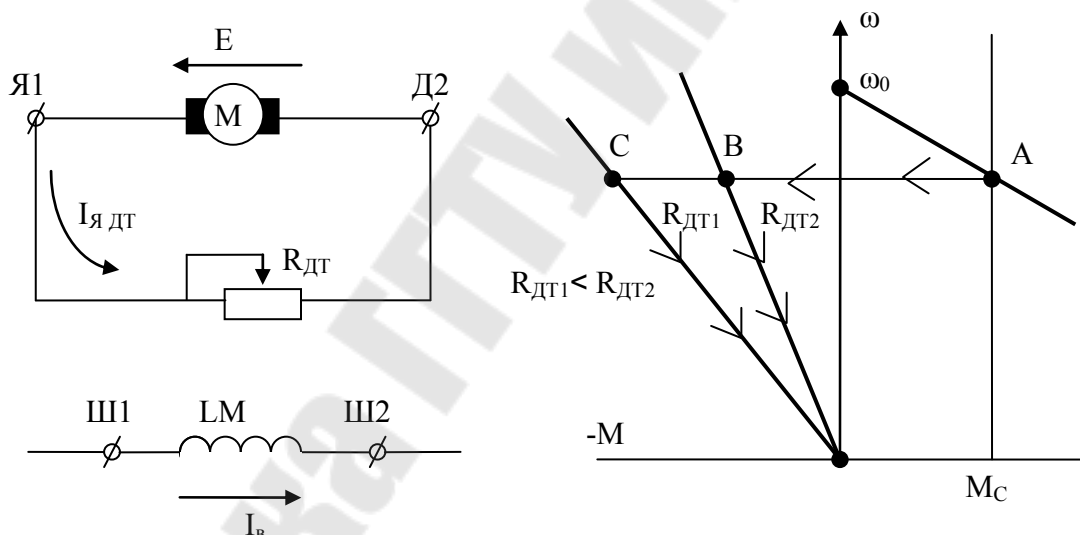


Рис. 2.4 – а) схема включения двигателя в режиме динамического торможения; б) характеристики двигателя в режиме динамического торможения

Момент двигателя становится тормозным $M = -k\Phi I_я$. Поскольку $U=0$, уравнение механической характеристики двигателя в режиме динамического торможения имеет вид:

$$\omega = -\frac{MR_{яц}}{k^2\Phi^2}.$$

Механические характеристики двигателя в режиме динамического торможения приведены на рис. 2.4б. Они представляют распо-

ложенные во втором квадранте прямые линии, проходящие через начало координат.

Двигатель, работавший в точке А на естественной характеристике, в зависимости от величины $R_{дт}$ перейдет в точку В или С на характеристике динамического торможения. С уменьшением скорости двигателя ω будут уменьшаться E , $I_{ядт}$ и тормозной момент двигателя M . При $\omega=0$ будут равны нулю E , $I_{ядт}$, M , поэтому характеристика динамического торможения и проходит через начало координат.

Двигатель в режиме динамического торможения работает как автономный генератор. Он преобразовывает МЭ в ЭЭ, которая выделяется в виде тепла на сопротивлениях, включенных в цепь протекания $I_{ядт}$.

Динамическое торможение используется для остановки электропривода при реактивном M_c , при опускании груза в подъемных механизмах.

Торможение противовключением. Осуществляется в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а вращающаяся часть двигателя под воздействием сил инерции или активного момента сопротивления M_c вращается в противоположную сторону – против включения.

Наиболее часто торможение противовключением используется в реверсивных электроприводах, так как реверсу двигатель обязательно предшествует процесс торможения. Реверсивная схема включения ДПТ с независимым возбуждением приведена на рис. 2.5. Реверс осуществляется со стороны якоря двигателя, для чего якорь включен в реверсивный мост, образованный главными контактами контакторов направления вращения КВ («вперед» в электроприводах передвижения или «верх» в электроприводах подъёма) и КН («назад» и «низ» соответственно). При реверсе со стороны обмотки возбуждения она включается в реверсивный мост, образованный контактами электрических аппаратов меньшего габарита, так как потребляемая по цепи питания обмотки возбуждения мощность не превышает 15% мощности, потребляемой по цепи питания якоря. Однако реверс со стороны якоря осуществляется гораздо быстрее, поскольку постоянная времени якорной цепи T_y на порядок меньше постоянной времени цепи возбуждения T_v .

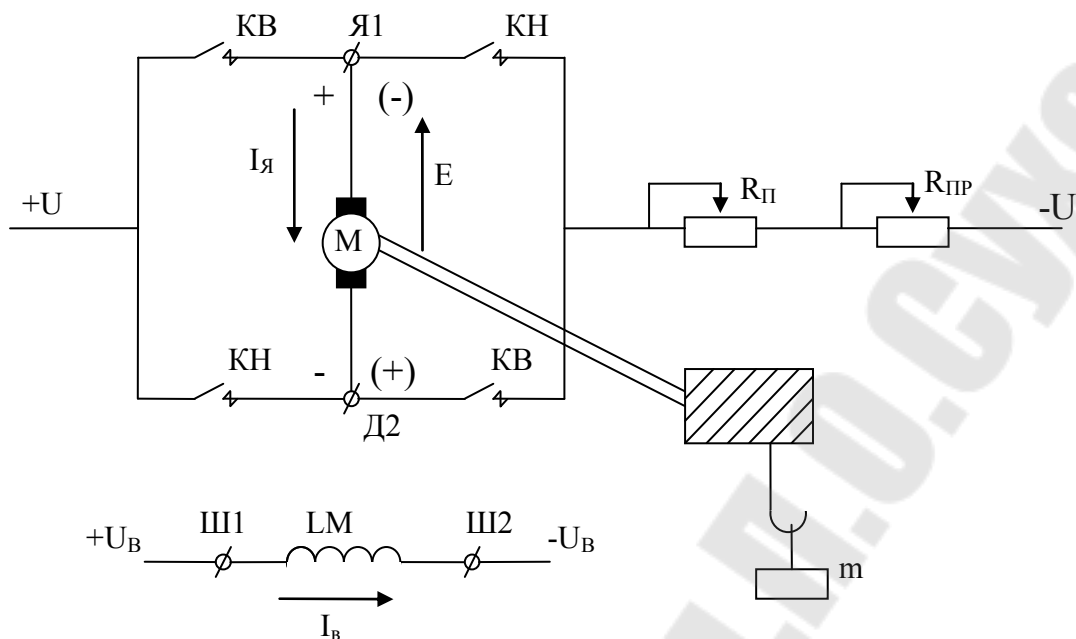


Рис 2.5 - Реверсивная схема включения ДПТ с независимым возбуждением

В цепь протекания тока $I_{я}$ включены пусковой реостат с сопротивлением $R_{п}$ и реостат противовключения $R_{пр}$. Такая схема включения двигателя может быть в электроприводе подъемной лебедки, на крюке которой подвешен груз массой m .

Допустим, что замкнуты контакты КВ, а $R_{п}$ и $R_{пр}$ зашунтированы, то есть их сопротивления равны нулю. Зажим якоря Я1 подключен к $+U$, а Д2 к $-U$ источника якорного напряжения. Ток в якоре $I_{я}$ протекает от Я1 к Д2, а э.д.с. вращения E направлено в обратную сторону, то есть от Д2 к Я1.

Размыкаются контакты КВ и замыкаются КН. Якорь двигателя подключается к источнику якорного напряжения с обратной полярностью. Это означает, что двигатель включается для работы в противоположном направлении. В момент переключения якорь двигателя под действием инерционных сил сохраняет направление вращения, то есть вращается против включения. Остается неизменным и направление тока в обмотке возбуждения LM. Поэтому сохраняется и направление э.д.с. вращения $A = k\omega\Phi$.

С изменением полярности напряжения на зажимах якоря изменяет направление ток якоря и поэтому момент двигателя становится тормозным. Так как величина E в установившемся режиме работы двигателя составляет около 90% от величины U , то в момент пере-

ключения напряжения на зажимах якоря $U \approx 2U_n$ и ток в начале режима торможения противовключением $I_{ЯПР}$ будет существенно превышать пусковой ток $I_{ЯП}$. Поэтому для его ограничения, а также ограничения момента двигателя, одновременно с замыкателем КН в цепь якоря кроме пускового реостата $R_{п}$ необходимо включать и реостат противовключения $R_{пр}$. Сопротивление реостата $R_{ПР}$ должно быть таким, чтобы $I_{ЯПР} \leq 2,5 I_{Ян}$. Тогда ток $I_{ЯПР}$ будет определяться по формуле:

$$I_{ЯПР} = \frac{-(U + E)}{R_{Я} + R_{ДП} + R_{КО} + R_{П} + R_{ПР}} \leq 2,5 I_{Ян}.$$

Характеристики ДПТ с независимым возбуждением, соответствующие схеме включения двигателя на рис. 2.5, приведены на рис. 2.6. Поскольку схема включения двигателя реверсивная, характеристики расположены в четырех квадрантах. При замкнутых контактах КВ и зашунтированных $R_{П}$ и $R_{ПР}$ двигатель работает на естественной характеристике в первом квадранте в точке А.

В момент переключения изменяется полярность напряжения на зажимах якоря двигателя и он оказывается включенным для работы в направлении «назад». Поэтому его характеристики будут начинаться в третьем квадранте в точке с координатами $(0; -\omega_0)$.

Изменяется направление тока якоря $I_{я}$ и вращающего момента двигателя M . Однако скорость двигателя ω остается неизменной, так как постоянная

времени электромагнитного переходного процесса гораздо меньше постоянной времени электромеханического переходного процесса. Поэтому двигатель из точки А переходит в точку В на характеристике противовключения во втором квадранте по прямой, параллельной оси абсцисс. Если величина $R_{ПР}$ выбрана правильно, то бросок тока якоря и тормозного момента при переключении не превысят допустимого значения.

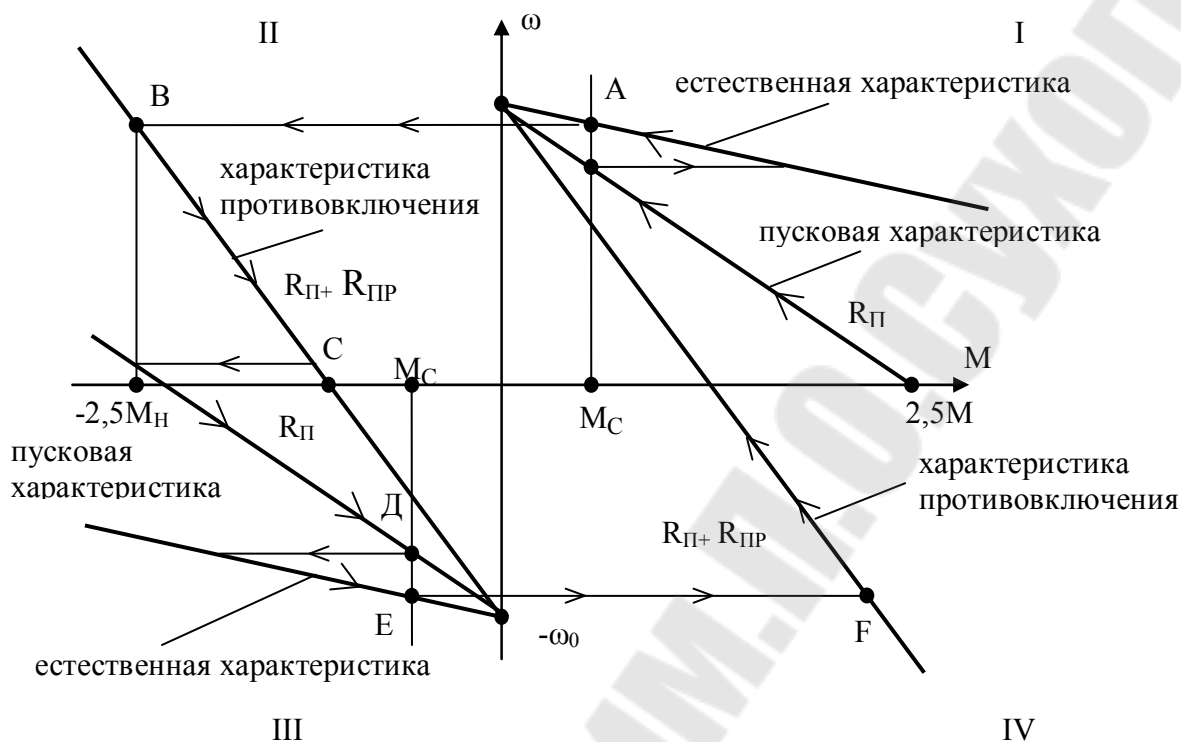


Рис. 2.6 - Характеристики ДПТ с независимым возбуждением в режиме торможения противовключенем

Под влиянием тормозного момента скорость двигателя уменьшается и если он тормозится для остановки, то в точке С необходимо разомкнуть КН и отключить двигатель от напряжения источника. Если же сразу после остановки начинается разгон в противоположном направлении, то при скорости близкой к нулю необходимо зашунтировать $R_{ДР}$ и перевести двигатель на предельную пусковую характеристику. Это обеспечит разгон в направлении «назад» с максимальным ускорением и позволит уменьшить время разгона. В третьем квадранте двигатель будет работать в точке Д на пусковой характеристике или в точке Е на естественной.

Если еще раз изменить полярность напряжения на зажимах якоря двигателя и ввести в якорную цепь $R_{Д}$ и $R_{ДР}$, двигатель перейдет из точки Е в точку F на характеристике противовключения в четвертом квадранте. Процесс торможения и разгон в направлении «вперед» будут протекать аналогично.

В электроприводах с активным M_c , например, в электроприводе подъемной лебедки, где активный M_c создает груз массой m , подвешенный на крюке, режим торможения противовключением можно

получить за счет изменения механической характеристики двигателя. Схема включения двигателя приведена на рис. 2.5, а соответствующие схеме включения механические характеристики двигателя приведены на рис. 2.7. Они располагаются в первом и четвертом квадранте, так как активный M_c не изменяет своего направления при изменении направления вращения двигателя.

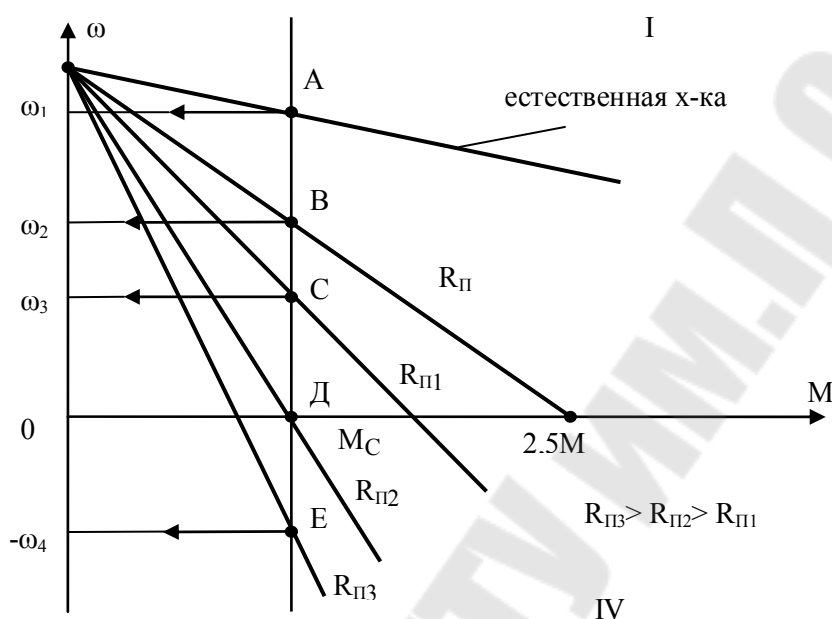


Рис. 2.7 - Характеристики ДПТ с независимым возбуждением в режиме торможения противовключением при активном M_c

Допустим, что замкнуты контакты КВ и зашунтированы R_{II} и R_{III} . Двигатель со скоростью ω_1 работает в направлении подъема на естественной характеристике в точке А.

При введении в цепь тока якоря пускового реостата R_{II} двигатель перейдет на предельную пусковую характеристику и будет работать в точке В со скоростью ω_2 . С введением R_{III} наклон характеристики будет увеличиваться, а скорость двигателя уменьшаться ($\omega = \omega_3$ при $R_{III} = R_{III1}$).

Можно так подобрать величину R_{III} , что M будет равен M_c при скорости двигателя ω , равной нулю. На рис. 2.7. этому случаю соответствует точка Д при $R_{III} = R_{III2}$. Двигатель останавливается, и поднимаемый груз удерживается в подвешенном состоянии за счет вращающего момента двигателя M . При

$R_{ПР} = R_{ПРЗ}$ момент двигателя M станет меньше M_c . Поднятый груз начнет опускаться и двигатель, включенный для работы на подъем, под действием активного M_c будет вращаться в направлении опускания – против включения. Момент двигателя становится тормозным. Поскольку якорь двигателя теперь вращается в обратную сторону, а направление магнитного потока не изменилось, изменит свое направление э.д.с. вращения двигателя $E = k \cdot \Phi \cdot \omega$. Величина якорного тока $I_{ЯПР}$ будет определяться выражением:

$$I_{ЯПР} = \frac{U + E}{R_{Я} + R_{ДП} + R_{КО} + R_{П} + R_{ПРЗ}}$$

С увеличением скорости опускания груза, будут увеличиваться E , $I_{ЯПР}$ и тормозной момент двигателя M . При $\omega = -\omega_4$ (точка Е на рис. 2.7.) величина тормозного момента двигателя M станет равной величине активного M_c и увеличение скорости опускания груза прекратится.

Такой режим торможения широко используется в электроприводах подъемных лебедок, так как он позволяет получить очень низкие «посадочные» скорости двигателя и устанавливать груз в требуемом месте без удара.

При торможении противовключением э.д.с. вращения E направлена последовательно – согласовано с напряжением якорного источника U , то есть двигатель работает в режиме генератора, включенного последовательно с сетью. Он преобразует МЭ в ЭЭ, а также потребляет ЭЭ из сети. Вся ЭЭ выделяется в виде тепла в двигателе и на сопротивлениях, включенных в цепи протекания тока якоря. Поэтому торможение противовключением не экономично с точки зрения затрат энергии, однако по сравнению с другими видами оно обеспечивает минимальное время торможения.

Лекция 7

2.5. Механические характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Двигательный режим

Схема включения двигателя приведена на рис. 2.8. Якорь двигателя M и обмотка возбуждения LM включены последовательно и получают питание от одного источника U . Поэтому ток якоря $I_{я}$ является и током возбуждения $I_{в}$. Это обстоятельство определяет единственное отличие в конструкции двигателя с последовательным возбуждением от двигателя с независимым возбуждением: обмотка возбуждения LM

ДПТ с последовательным возбуждением выполнена проводником того же сечения, что и обмотка якоря.

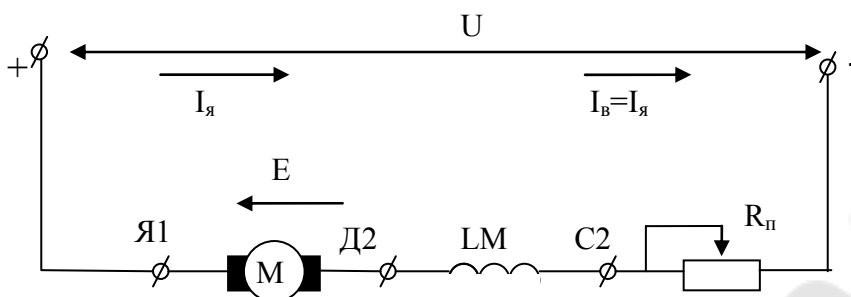


Рис. 2.8. Схема включения ДПТ с последовательным возбуждением

При вращающемся якоре в его обмотке наводится э.д.с. вращения E . На схеме включения двигателя направление E встречно по отношению направлению U , что соответствует двигательному режиму работы. Величина E равна:

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega$$

где ω – угловая скорость двигателя; Φ – поток двигателя;

$$k = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} - \text{конструктивный коэффициент двигателя данные}$$

для расчета, которого приводятся в справочниках. Здесь p – число пар полюсов двигателя; N – число активных проводников обмотки якоря; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

Направление якорного тока $Iя$, как и направление E на схеме включения показано для двигательного режима работы.

Допустимое значение якорного тока двигателя $Iя\ доп$ ограничивается условиями коммутации и механической прочностью якоря и не должно превышать номинальный ток $Iян$ более чем в 2,5 раза $Iя\ доп \leq 2,5 Iян$.

В соответствии с уравнением равновесия напряжений при установившемся режиме работы двигателя напряжение U , приложенное к якорной цепи двигателя уравнивается падением напряжения в якорной цепи $IяRяц$ и наведенной в обмотке якоря э.д.с. вращения E :

$$U = IяRяц + E$$

где $Rяц = Rя + Rдп + Rко + Rв + Rп$ – суммарное сопротивление якорной цепи. Здесь $Rя$ – сопротивление обмотки якоря; $Rдп$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов; $Rко$ – сопротивление компенсационной обмотки; $Rв$ – сопротивление обмотки возбуждения; $Rп$ – сопротивление пускового реостата.

Величина $I_{Я}$ в установившемся режиме будет равна:

$$I_{Я} = \frac{U - E}{R_{ЯЦ}}$$

В режиме пуска $E=0$, поэтому из-за небольшого сопротивления обмоток пусковой ток $I_{ЯП}$ может превышать допустимое значение. Для ограничения пускового тока служит пусковой реостат, сопротивление которого $R_{П}$ выбирается таким образом, чтобы $I_{ЯП} \leq I_{ЯДОП}$

$$I_{ЯП} = \frac{U}{R_{Я} + R_{ДП} + R_{КО} + R_{В} + R_{П}} \leq 2.5 I_{ЯН}$$

Из уравнения равновесия напряжений для якорной цепи можно получить аналитическое выражение для механической характеристики двигателя.

Подставив в него вместо э.д.с. вращения E ее значение и решив полученное уравнение относительно скорости, получим зависимость скорости двигателя ω от тока якоря $I_{Я} \omega = f(I_{Я})$, которая называется электромеханической характеристикой:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_{Я} R_{ЯЦ}}{k\Phi}$$

Поскольку обмотка возбуждения включена последовательно с якорем двигателя, создаваемый ею магнитный поток Φ является функцией тока якоря $I_{Я}$. Зависимость $\Phi = f(I_{Я})$ называется кривой намагничивания и носит нелинейный характер типа «зона насыщения». Точного аналитического описания этой кривой не существует, поэтому нет и точного аналитического описания механической характеристики ДПТ с последовательным возбуждением. Если, пренебрегая насыщением магнитной системы, предположить линейную зависимость между Φ и $I_{Я}$ с коэффициентом пропорциональности α , то есть считать $\Phi = \alpha I_{Я}$, то вращающий момент будет равен:

$$M = k\Phi I_{Я} = k\alpha I_{Я}^2$$

Отсюда величина тока якоря будет равна:

$$I_{Я} = \sqrt{\frac{M}{k\alpha}}$$

Подставив в уравнение электромеханической характеристики значение для $I_{Я}$, получим уравнение механической характеристики:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_{Я} R_{ЯЦ}}{k\Phi} = \frac{U}{k\alpha I_{Я}} - \frac{I_{Я} R_{ЯЦ}}{k\alpha I_{Я}} = \frac{U}{k\alpha \sqrt{\frac{M}{k\alpha}}} - \frac{R_{ЯЦ}}{k\alpha} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B$$

где $A=U/k\alpha$; $B=R_{ЯЦ}/(k\alpha)$ – постоянные величины.

Анализ полученного уравнения показывает, что ось ординат является асимптотой для кривой и что в области малых значений моментов она имеет большую крутизну

При $R_{II}=0$ и $U=U_n$ двигатель работает на естественной характеристике. Для построения естественной характеристики используются так называемые универсальные характеристики, приводимые в каталогах для каждой серии двигателей. Они представляют зависимости $n=f(I_{Я})$ и $M=f(I_{Я})$ в относительных единицах. Зная номинальные данные двигателя, можно построить его характеристику в абсолютных величинах. Такая характеристика приведена на рис. 2.9.

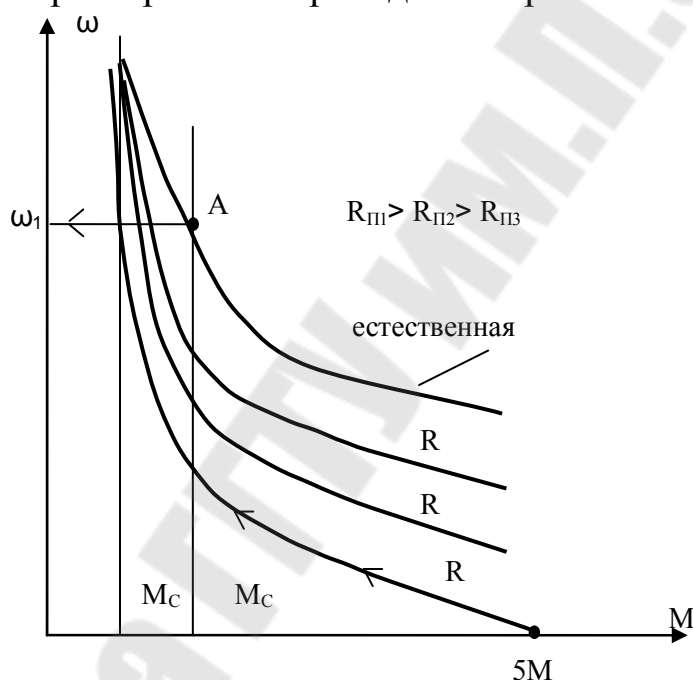


Рис. 2.9. Механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Особенностью характеристики является резкое увеличение скорости при уменьшении момента сопротивления M_c . По этому двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением нельзя запускать в тех случаях, когда $M_c < 15 \div 20\% M_n$, так как скорость двигателя может превышать допустимое значение $\omega_{дон} = 2,5 \omega_n$. Пояснить эту особенность можно, рассмотрев процессы, протекающие в двигателе при уменьшении нагрузки. Допустим, что двигатель работал в точке А на естественной характеристике (см. рис. 2.9.) в установившемся режиме со скоростью ω_1 . При уменьшении момента сопротив-

ления от величины M_{c1} например, до величины M_{c2} , появляется положительный динамический момент $M_D > 0$ и скорость двигателя начинает увеличиваться. При независимом возбуждении следствием этого будет увеличение э.д.с. вращения $\dot{A} = k\omega\dot{\Phi}$ и уменьшение тока якоря $I_\beta = \frac{U - E}{R_{\beta\delta}}$ и вращающего момента $M = kI_\beta\Phi$. Увеличение скорости и

уменьшение момента двигателя будет продолжаться до тех пор, пока момент двигателя M не станет равным M_{c2} и M_D станет равным нулю.

При последовательном возбуждении э.д.с. вращения E оказывается функцией двух величин – увеличивающейся скорости ω и уменьшающегося потока Φ . В результате этого величина E , а значит и величины I_β и M , с ростом скорости существенно изменятся не будут, что приводит к сохранению $M_D > 0$ и дальнейшему росту скорости. Если сопротивление пускового реостата $R_{\Pi} > 0$, то статическое падение скорости $\Delta\omega_c$ при одном и том же моменте двигателя будет больше, чем на естественной характеристике. Поэтому реостатные характеристики будут иметь большой наклон к оси абсцисс.

При последовательном возбуждении вращающий момент пропорционален квадрату тока якоря $\dot{A} = k\alpha I_\beta^2$ и ограничение пускового тока значением $I_{\beta \text{ доп}} \leq 2,5 I_{\beta \text{ н}}$ позволяет получить гораздо больше чем при независимом возбуждении значение $M_{\text{доп}} = 5 M_{\text{н}}$. Коэффициент перегрузки двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением по моменту

$K_{\Pi} = M_{\text{доп}} / M_{\text{н}}$ равен пяти. Такой перегрузочной способностью не обладает больше не один электрический двигатель. Именно благодаря этому свойству двигатели с последовательным возбуждением используются в электрическом транспорте и подъемных механизмах.

Лекция 8

2.6. Механические характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Режим электрического торможения

Возможны два режима электрического торможения: динамическое торможение и торможение противовключением. Рекуперативное торможение осуществить не возможно, так как э.д.с. вращения E не может быть больше напряжения якорного источника U .

Динамическое торможение осуществляется двумя способами: с самовозбуждением и с независимым возбуждением. Схема включе-

ния двигателя и механические характеристики для первого случая приведены на рис. 2.10.

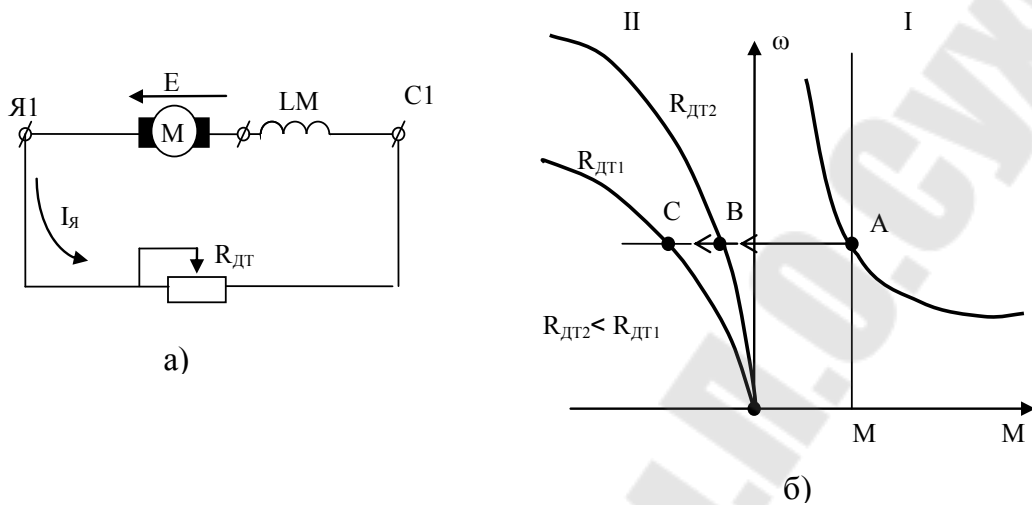


Рис. 2.10. а) схема включения двигателя в режиме динамического торможения с самовозбуждением;
б) характеристики двигателя в режиме динамического торможения с самовозбуждением

Двигатель отключен от напряжения источника, а обмотка возбуждения переключена таким образом, чтобы направление тока I_B в ней было таким же как а в двигательном режиме (см. рис. 2.8). Это сохранение направления тока исключает уничтожение малого остаточного потока, связанного с намагничиванием статора двигателя. Этот поток и является причиной самовозбуждения: в обмотке якоря, вращающегося под действием инерционных сил в прежнем направлении, наводится э.д.с. E , направление которой такое же, как и в двигательном режиме. Под действием E в контуре динамического торможения появляется ток, что приводит к увеличению потока Φ , э.д.с. E и тока I_A . Поскольку ток I_A по отношению к двигательному режиму имеет противоположное направление, момент двигателя становится тормозным. Двигатель из точки А в первом квадранте переходит в точку В или С на характеристике динамического торможения во втором квадранте. Вначале процесс самовозбуждения проходит очень интенсивно и это приводит к броску тормозного момента, способного вызвать удары в механической части привода. Поэтому чаще применяют динамическое торможение с независимым возбуждением. Схема включения двигателя и механические характеристики приведены на рис. 2.11.

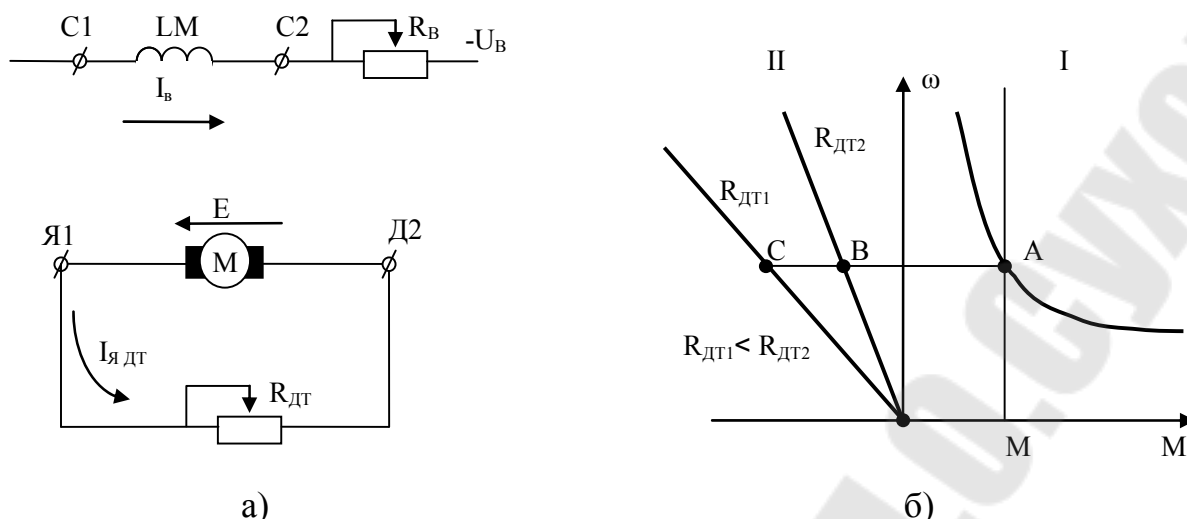


Рис. 2.11. а) схема включения двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбуждением;
 б) характеристики двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбуждением

Зажимы якоря двигателя закорачиваются на сопротивление динамического торможения $R_{ДТ}$, а обмотка возбуждения подключается к напряжению источника через сопротивление R_B . Ток в ней направлен как и в двигательном режиме и устанавливается равным номинальному. Характеристики аналогичны характеристикам ДПТ с независимым возбуждением: они линейны, расположены во втором квадранте и проходят через начало координат.

Торможение противоключением, как и для ДПТ с независимым возбуждением, осуществляется в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а якорь двигателя под воздействием сил инерции или активного момента сопротивления вращения вращается в противоположную сторону – против включения.

Реверсивная схема включения ДПТ с последовательным возбуждением приведена на рис. 2.12.

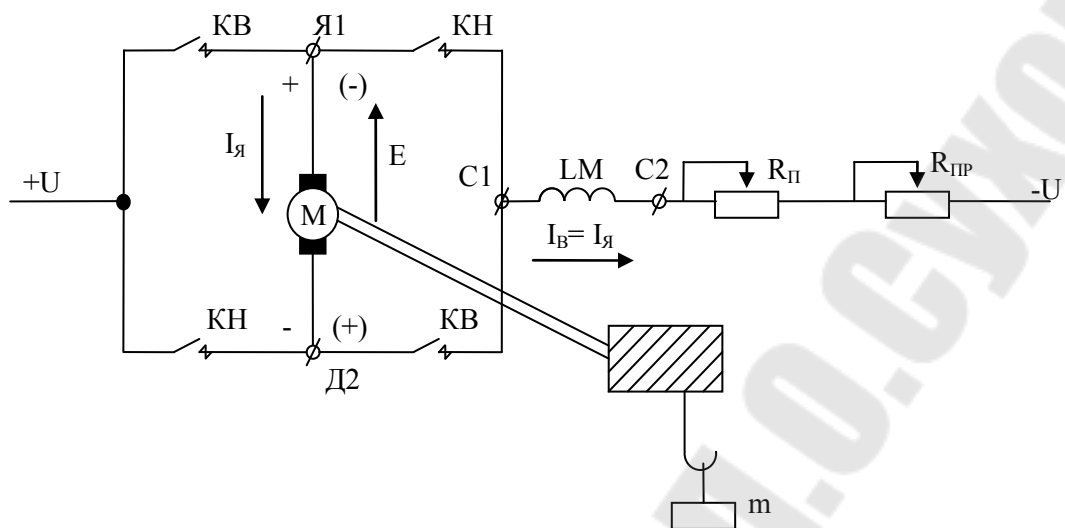


Рис. 2.12. Реверсивная схема включения ДПТ с последовательным возбуждением

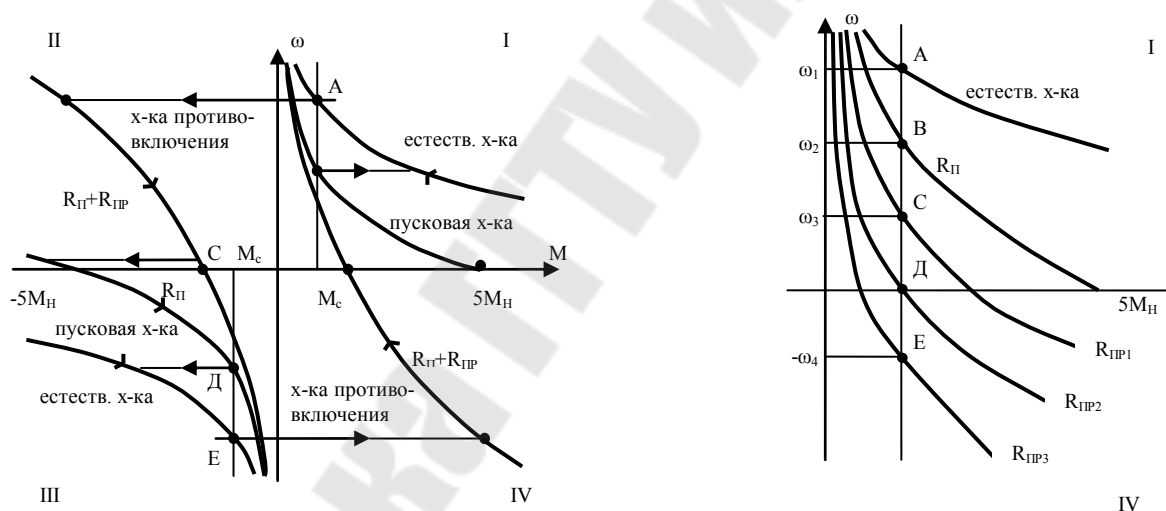


Рис. 2.13. а) характеристики ДПТ с последовательным возбуждением в режиме торможения противоключением.
б) аналогичные характеристики при активном M_c

Назначение элементов такое же, как и на схеме рис. 2.5. При реверсе двигателя со стороны якоря направление тока в обмотке возбуждения LM сохраняется. Поэтому все процессы при торможении аналогичны происходящим в схеме рис. 2.5. Характеристики двигателя приведены на рис. 2.13.

Лекция 9

2.7. Механические характеристики асинхронных двигателей. Двигательный режим

Асинхронные двигатели (АД) – самый распространенный вид двигателей, т.к. они более просты и надежны в эксплуатации, при равной мощности имеют меньшую массу, габариты и стоимость в сравнении с ДПТ. Схемы включения АД приведены на рис. 2.14.

До недавнего времени АД с короткозамкнутым ротором применялись в нерегулируемых электроприводах. Однако с появлением тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) напряжения, питающего статорные обмотки АД, двигатели с короткозамкнутым ротором начали использоваться в регулируемых электроприводах. В настоящее время в преобразователях частоты применяются силовые транзисторы и программируемые контроллеры. Способ регулирования скорости получил название импульсного и его совершенствование является важнейшим направлением в развитии электропривода.

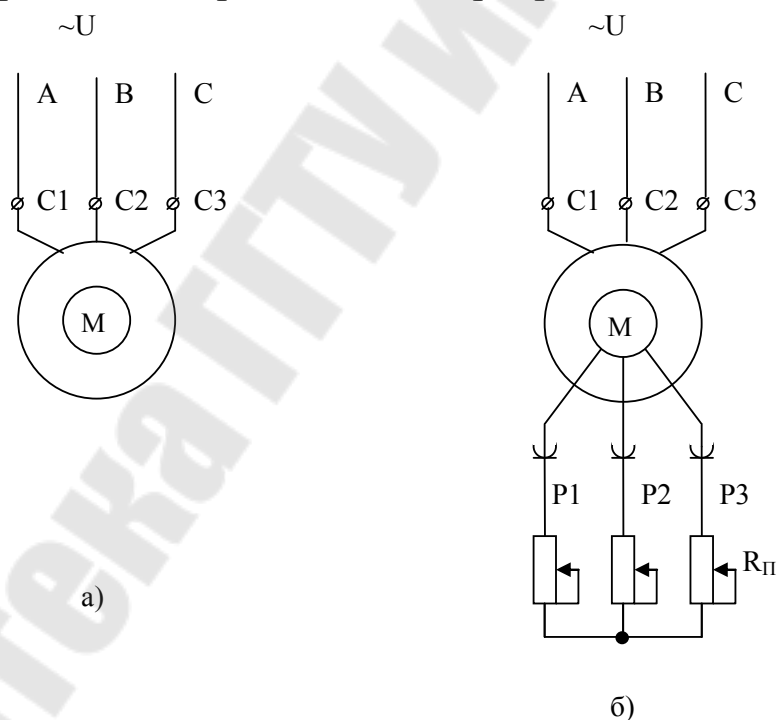


Рис. 2.14. а) схема включения АД с короткозамкнутым ротором;
б) схема включения АД с фазным ротором

Уравнение для механической характеристики АД может быть получено на основании схемы замещения АД. Если в этой схеме пренебречь активным сопротивлением статора, то выражение для механической характеристики будет иметь вид:

$$M = \frac{2M_k}{S/S_k + S_k/S},$$

$$\text{где } M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 x_k}; \quad S_k = \frac{R_2^1}{x_k}.$$

Здесь M_k – критический момент; S_k – соответствующее ему критическое скольжение; U_ϕ – действующее значение фазного напряжения сети; $\omega_0 = 2\pi f/p$ – угловая скорость вращающегося магнитного поля АД (синхронная скорость); f – частота питающего напряжения; p – число пар полюсов АД; x_k – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания (определяется из схемы замещения); $S = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ – скольжение (скорость ротора относительно скорости вращающегося поля); R_2^1 – суммарное активное сопротивление фазы ротора.

Механическая характеристика АД с короткозамкнутым ротором приведена на рис. 2.15.

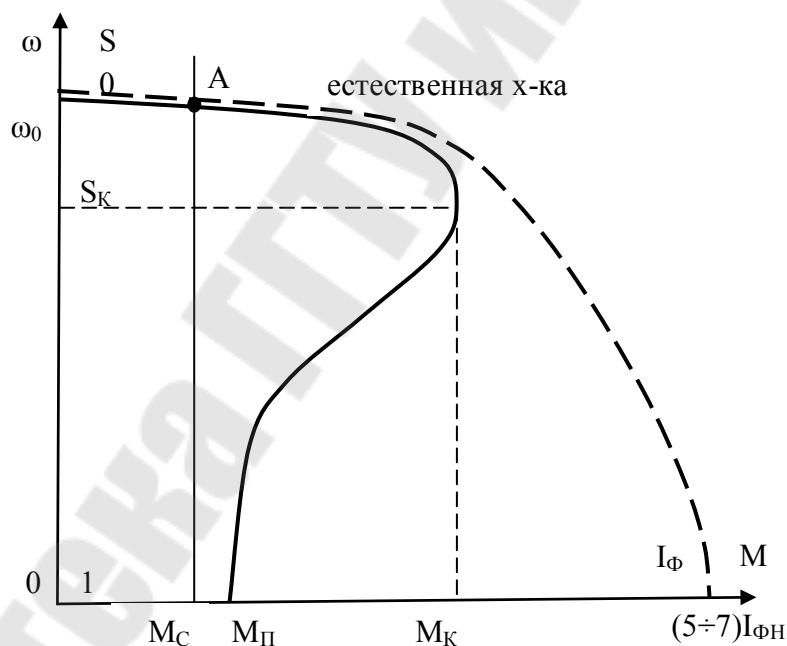


Рис. 2.15. Механическая характеристика АД с короткозамкнутым ротором

На ней можно выделить три характерные точки. Координаты первой точки ($S=0$; $\omega=\omega_0$; $M=0$). Она соответствует режиму идеального холостого хода, когда скорость ротора равна скорости вращающегося магнитного поля. Координаты второй точки ($S=S_k$; $M=M_k$). Двигатель работает с максимальным моментом. При $M_c > M_k$ ротор двигателя будет принудительно остановлен, что для двигателя явля-

ется режимом короткого замыкания. Поэтому вращающий момент двигателя в этой точке и называется критическим M_k . Координаты третьей точки ($S=1$; $\omega=0$; $M=M_n$). В этой точке двигатель работает в режиме пуска: скорость ротора $\omega=0$ и на неподвижный ротор действует пусковой момент M_n . Участок механической характеристики, расположенный между первой и второй характерными точками, называется рабочим участком. На нем двигатель работает в установившемся режиме. У АД с короткозамкнутым ротором при выполнении условий $U=U_n$ и $f=f_n$ механическая характеристика называется естественной. В этом случае на рабочем участке характеристики расположена точка, соответствующая номинальному режиму работы двигателя и имеющая координаты (S_n ; ω_n ; M_n).

Электромеханическая характеристика АД $\omega=f(I_\phi)$, которая на рис.2.15 изображена штриховой линией, в отличие от электромеханической характеристики ДПТ, совпадает с механической характеристикой только на ее рабочем участке. Это объясняется тем, во время пуска из-за изменяющейся частоты э.д.с. в обмотке ротора E_2 изменяется частота тока и соотношение индуктивного и активного сопротивлений обмотки: в начале пуска частота тока большая и индуктивное сопротивление больше активного; с увеличением скорости вращения ротора ω частота тока ротора, а значит и индуктивное сопротивление его обмотки, уменьшается. Поэтому пусковой ток АД в режиме прямого пуска в $5\div 7$ раз превышает номинальное значение $I_{\phi n}$, а пусковой момент M_n равен номинальному M_n . В отличие от ДПТ, где при пуске необходимо ограничивать пусковой ток и пусковой момент, при пуске АД пусковой ток необходимо ограничивать, а пусковой момент увеличивать. Последнее обстоятельство наиболее важно, поскольку ДПТ с независимым возбуждением запускается при $M_c < 2,5M_n$, ДПТ с последовательным возбуждением при $M_c < 5M_n$, а АД при работе на естественной характеристике при $M_c < M_n$.

У АД с короткозамкнутым ротором увеличение M_n обеспечивается специальной конструкцией обмотки ротора. Паз для обмотки ротора делают глубоким, а саму обмотку располагают в два слоя. При пуске двигателя частота E_2 и токи ротора большие, что приводит к появлению эффекта вытеснения тока – ток протекает только в верхнем слое обмотки. Поэтому увеличивается сопротивление обмотки и пусковой момент двигателя M_{II} . Его величина может достигать $1,5M_n$.

У АД с фазным ротором увеличение M_{II} обеспечивается за счет изменения его механической характеристики. Если сопротивление R_{II} ,

включенное в цепь протекания тока ротора, равно нулю – двигатель работает на естественной характеристике и $M_{\Pi} = M_H$. При $R_{\Pi} > 0$ увеличивается суммарное активное сопротивление фазы ротора R_2^1 . Критическое же скольжение S_K по мере увеличения R_2^1 тоже увеличивается. Вследствие этого у АД с фазным ротором введение R_{Π} в цепь протекания тока ротора приводит к смещению M_K в сторону больших скольжений. При $S_K = 1$ $M_{\Pi} = M_K$. Механические характеристики АД с фазным ротором при $R_{\Pi} > 0$ называются искусственными или реостатными. Они приведены на рис. 2.16.

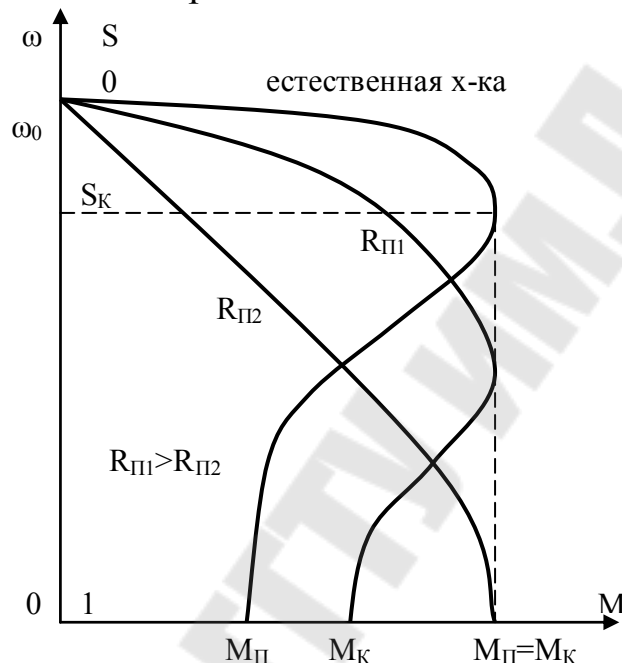


Рис. 2.16. Механические характеристики АД с фазным ротором

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором запустится при $M_n > M_c$ и будет работать в точке А (см. рис. 2.15). После этого момент сопротивления M_c можно увеличивать до M_K . АД, как и двигатели постоянного тока, при увеличении M_c будет автоматически, без вмешательства извне, снижать скорость ω и увеличивать вращающий момент M до тех пор, пока M и M_c не сравняются по величине, т.е. из установившегося режима с большей скоростью переходить в установившийся режим с меньшей скоростью. При уменьшении M_c будет наблюдаться обратное – двигатель из установившегося режима с меньшей скоростью будет автоматически переходить в установившийся режим с большей скоростью. Рабочий участок механической характеристики АД аналогичен механической характеристике ДПТ с независимым возбуждением – прямая линия, наклоненная к оси абсцисс.

Таковыми свойствами АД обладает благодаря э.д.с. E_2 , которая наводится вращающимся магнитным полем статора в обмотке ротора. При $M_c > M$ динамический момент $M_d < 0$ и скорость ротора ω уменьшается. Магнитное поле статора, вращающееся с постоянной скоростью ω_0 (синхронной скоростью) будет пересекать обмотку ротора с большой частотой. Поэтому будет увеличиваться E_2 , ток в обмотке ротора, сила Ампера, действующая на ее витки, а значит и вращающий момент M .

Перегрузочная способность АД по моменту определяется отношением критического момента M_K к моменту номинальному M_H . Для обычных АД с короткозамкнутым ротором $M_K/M_H = 1,7$, с фазным ротором $M_K/M_H = 1,8$. Для специальных крановых АД с короткозамкнутым ротором типа МТК и фазным ротором типа МТКФ отношение $M_K/M_H = 2,3 \div 3,4$.

Лекция 10

2.8. Механические характеристики асинхронных двигателей. Режим электрического торможения

Асинхронный двигатель, как и двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, может работать во всех трех режимах электрического торможения.

Рекуперативное торможение. Возврат энергии в сеть возможен при скорости ротора ω выше синхронной скорости ω_0 . По мере приближения ω к ω_0 уменьшается величина E_2 , ток в обмотке ротора и вращающий момент двигателя M . Увеличение ω до значений, больших ω_0 возможно под влиянием M_c , способствующего вращению двигателя. В данном случае АД работает как генератор, включенный параллельно с сетью: занесенную в движущихся элементах механической части электропривода механическую энергию он преобразует в электрическую и возвращает ее в сеть. Применяется режим рекуперативного торможения в электроприводах подъемных лебедок различных грузоподъемных машин. Реверсивная схема включения АД с фазным ротором приведена на рис. 2.17а, а соответствующие ей характеристики АД для режима рекуперативного торможения – на рис. 2.17б.

Реверсировать АД, в отличие от ДПТ, можно только одним способом – изменением порядка чередования фаз напряжения, питающего статорные обмотки двигателя. Для этого используют два трехпо-

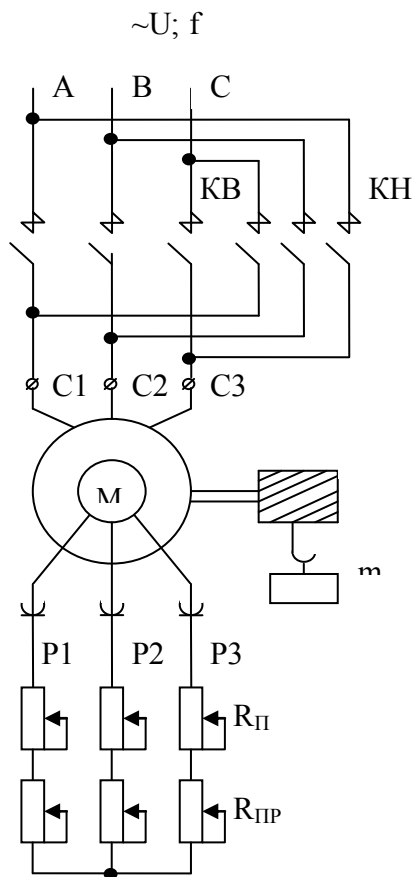
люсных контактора (в электроприводах малой и средней мощности – магнитных пускателя), конструкция которых имеет механическую блокировку, исключающую возможность одновременного срабатывания контакторов. На рис. 2.17а показаны главные контакты контакторов направления КВ (вперед или верх) и КН (назад или низ).

При замкнутых КВ статорные обмотки АД подключены к сети с прямым порядком чередования фаз – вывод С1 статорных обмоток к напряжению фазы А, вывод С2 – фазы В и вывод С3 – фазы С. Вращающееся магнитное поле и ротор двигателя вращаются в направлении «вперед».

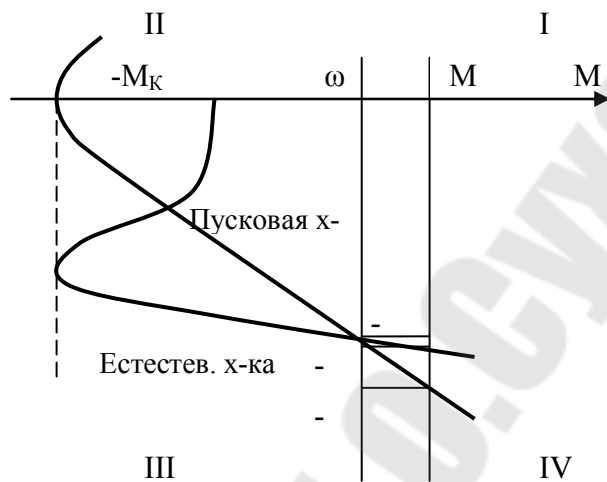
При разомкнутых КВ и замкнутых КН вывод С1 будет подключен к напряжению фазы С, вывод С2 останется подключенным к напряжению фазы В, а вывод С3 будет подключен к напряжению фазы А. прямой порядок чередования фаз (А, В, С)изменяется на обратный (С, В, А). В результате этого изменяется направление вращения поля и ротора двигателя.

Поднятый груз создает активный момент сопротивления M_c , направление которого не изменяется при изменении направления вращения двигателя (см. рис. 2.17б). Поэтому при замыкании КН и включении двигателя в направлении опускания груза ротор двигателя будут раскручивать как вращающий момент сопротивления M_c . Уравнение движения электропривода будет иметь вид:

$$+M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$



а)



б)

Рис. 2.17. а) реверсивная схема включения АД с фазным ротором;

б) механические характеристики АД с фазным ротором в режиме рекуперативного торможения

Скорость вращения двигателя, а значит и скорость опускания груза, будет увеличиваться. При $\omega = \omega_0$ вращающий момент $M = 0$ и уравнение движения примет вид:

$$M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Скорость двигателя будет расти под действием активного M_c . Когда скорость ротора превысит скорость вращающегося поля ($\omega > \omega_0$), момент двигателя изменит направление и станет тормозным, а уравнение движения электропривода будет иметь вид:

$$-M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Поскольку схема включения двигателя не изменяется, механические характеристики АД для режима рекуперативного торможения (как и для ДПТ с независимым возбуждением) получаются продолжением характеристик для двигательного режима в третьем квадранте в четвертый.

С увеличением скорости двигателя будет расти величина тормозного момента M . При работе двигателя на естественной характеристике M станет равным M_c при скорости $(-\omega_1)$ и двигатель перейдет в установившийся режим работы. Груз будет опускаться с постоянной скоростью. На реостатных характеристиках скорость установившегося режима будет больше $-(\omega_2)$ на пусковой характеристике.

Торможение противоключением, как и для ДПТ с независимым возбуждением, осуществляется в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а ротор двигателя под воздействием сил инерции или активного момента сопротивления вращается в противоположную сторону – против включения.

Допустим, что на рис. 2.17а замкнуты контакты КВ, а R_{II} и R_{III} зашунтированы. Статорные обмотки подключены к напряжению сети с прямым порядком чередования фаз.

Размыкаются контакты КВ и замыкаются КН. Работающий двигатель включается на противоположное направление. Статорные обмотки двигателя подключаются к сети с обратным порядком чередования фаз. Изменяется направление вращения магнитного поля статора, а ротор двигателя под действием инерционных сил сохраняет направление вращения – вращается против включения. Изменяет направление вращающий момент двигателя, т.е. он становится тормозным.

Поскольку ротор двигателя вращается навстречу полю, частота, с которой вращающееся поле пересекает обмотку ротора, в два раза превышает частоту при пуске (ротор неподвижен, а поле вращается с синхронной скоростью ω_0). Наводимая в обмотке ротора э.д.с. E_2 в два раза превышает номинальную э.д.с. $E_{2н}$, наводимую в обмотке ротора при пуске. Поэтому для ограничения тока в цепь ротора необходимо кроме пускового сопротивления R_{II} включать сопротивление противоключения R_{III} . Механические характеристики двигателя, соответствующие схеме включения на рис. 2.17а, приведены на рис. 2.18. При замкнутых КВ и зашунтированных R_{II} и R_{III} двигатель работал на естественной характеристике в точке А. После размыкания КВ, включения в цепь ротора $R_{II}+R_{III}$ и замыкания КН двигатель из точки

А переходит в точку В на характеристике торможения противовключением. Под действием тормозного момента скорость двигателя будет снижаться. Если двигатель тормозится для остановки, то в точке С при $\omega=0$ необходимо разомкнуть КН.

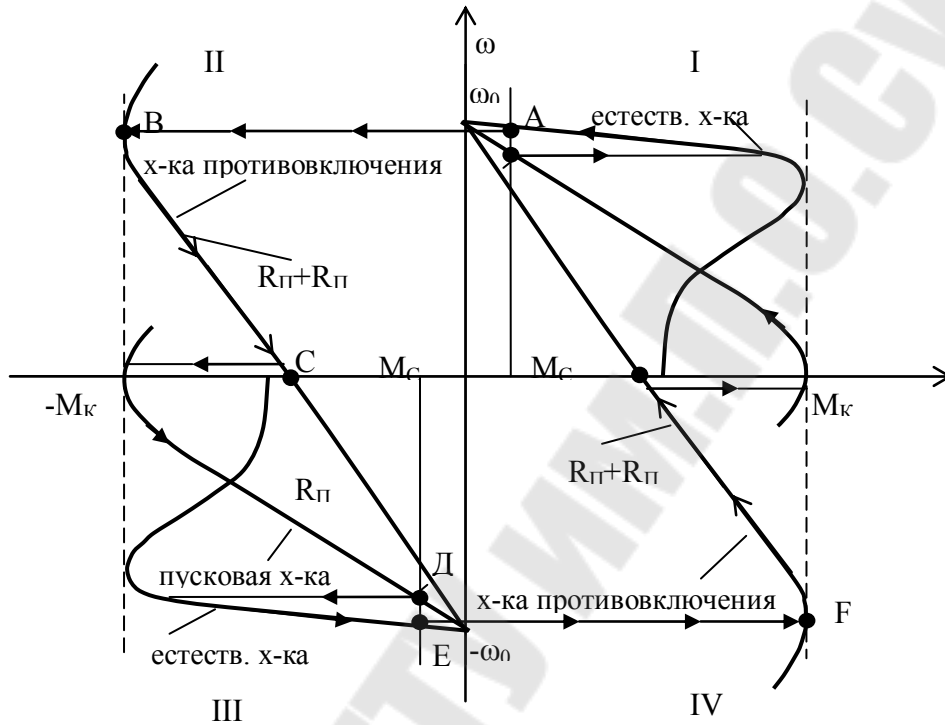


Рис. 2.18. Механические характеристики АД с фазным ротором в режиме торможения противовключением

Если же после остановки начинается разгон в противоположном направлении, то при скорости близкой к нулю необходимо зашунтировать R_{II} и перевести двигатель на предельную пусковую характеристику. На этой характеристике двигатель закончит торможение и сразу же начнет разгон в противоположном направлении с максимальным ускорением. В третьем квадранте он может работать в установившемся режиме в точке Д на пусковой характеристике или в точке Е на естественной. Если разомкнуть КН, включить в цепь ротора $R_{II}+R_{PI}$ и замкнуть КВ двигатель

из точки Е перейдет в точку F на характеристике противовключения в четвертом квадранте. Процесс торможения и разгон будут проходить аналогично.

При реверсивной схеме включения АД с короткозамкнутым ротором у двигателя будут две естественных характеристики (см. рис.

2.17б) в первом и третьем квадрантах. Для получения характеристик торможения противовключением естественные характеристики следует продлить во второй и четвертый квадранты. Процессы торможения и разгона будут протекать аналогично рассмотренным для АД с фазным ротором. Однако нагрев двигателя будет намного большим, т.к. ограничение тока ротора отсутствует.

В электроприводах с активным M_c , например, в электроприводе подъемной лебедки, где активный M_c создает груз массой m , подвешенный на крюке, режим торможения противовключением можно получить за счет изменения механической характеристики двигателя. Схема включения двигателя приведена на рис. 2.17а, а механические характеристики двигателя на рис. 2.19.

Допустим, что замкнуты КВ и зашунтированы R_{II} и R_{III} . Двигатель со скоростью ω_1 работает в направлении подъема на естественной характеристике в точке А.

При введении в цепь ротора пускового реостата R_{II} двигатель перейдет на предельную пусковую характеристику и будет работать в точке В со скоростью ω_2 . С введением R_{III} наклон характеристики будет увеличиваться, а скорость движения уменьшается ($\omega = \omega_3$ при $R_{III} = R_{III1}$).

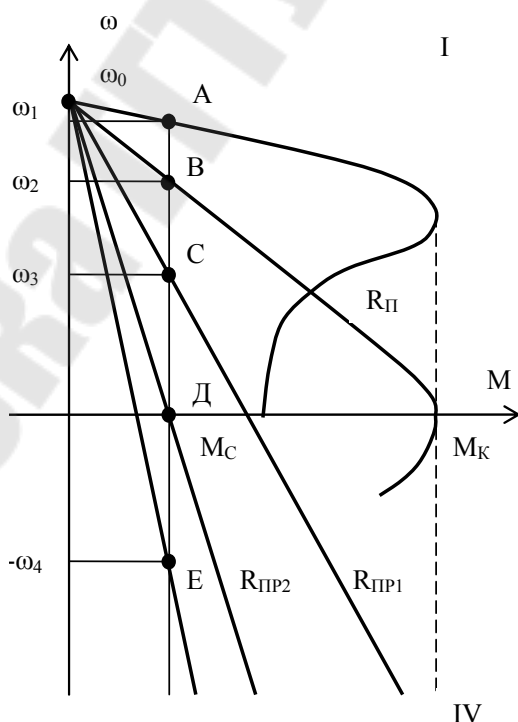


Рис. 2.19. Механические характеристики АД с фазным ротором в режиме торможения противовключением при активном M_c

Можно так подобрать величину $R_{ПР}$, что M будет равен M_c при скорости двигателя ω , равной нулю. На рис. 2.19 этому случаю соответствует точка Д при $R_{ПР} = R_{ПР2}$. Двигатель останавливается и поднимаемый груз удерживается в подвешенном состоянии за счет вращающего момента двигателя M . При

$R_{ПР} = R_{ПР3}$ момент двигателя M станет меньше M_c . Поднятый груз начнет опускаться и двигатель, включенный для работы на подъем, под действием активного M_c будет вращаться в направлении опускания – против включения. Момент двигателя становится тормозным. С увеличением скорости опускания груза он будет увеличиваться. При $\omega = -\omega_4$ (точка Е на рис. 2.19) величина тормозного момента двигателя M станет равной величине активного M_c . Двигатель перейдет в установившийся режим работы и увеличение скорости опускания груза прекратится. Такой режим торможения широко используется в электроприводах подъемных лебедок, так как он позволяет получить очень низкие «посадочные» скорости двигателя и устанавливать груз в требуемом месте без удара.

При торможении противовключением АД работает в режиме генератора, включенного последовательно с сетью. Он преобразует механическую энергию в электрическую, а также потребляет электрическую энергию из сети. Вся электроэнергия выделяется в виде тепла в двигателе и на сопротивлениях, включенных в цепи протекания тока ротора. Поэтому торможение противовключением не экономично с точки зрения затрат энергии, однако по сравнению с другими видами оно обеспечивает минимальное время торможения.

Динамическое торможение осуществляется при отключении обмоток статора от сети переменного тока и подключении двух из них к сети постоянного тока. Схема включения двигателя приведена на рис. 2.20а, механические характеристики – на рис. 2.20б.

При замкнутых КЛ и разомкнутых КДТ и зашунтированном $R_{ДТ}$ двигатель работает в первом квадранте на естественной характеристике в точке А.

При размыкании КЛ и замыкании КДТ выводы С2 и С3 статорных обмоток подключаются к сети постоянного тока. Постоянный ток, протекая к обмотке статора, образует неподвижное магнитное поле. В обмотке вращающегося ротора наводится э.д.с., под действием которой протекает переменный ток. Создаваемое этим током поле неподвижно относительно статора. Тормозной момент возникает в результате взаимодействия суммарного магнитного потока с током ротора.

Двигатель из точки А перейдет в точку В на одной из характеристик динамического торможения, которые расположены во втором квадранте. Они проходят через начало координат, так как при $\omega=0$ э.д.с. ротора, ток ротора и тормозной момент двигателя тоже будут равны нулю.

В режиме динамического торможения двигатель работает как автономный генератор. Механическую энергию, запасенную в движущихся элементах механической части он преобразовывает в электрическую и расходует ее на нагрев обмоток и дополнительных сопротивлений в цепи ротора.

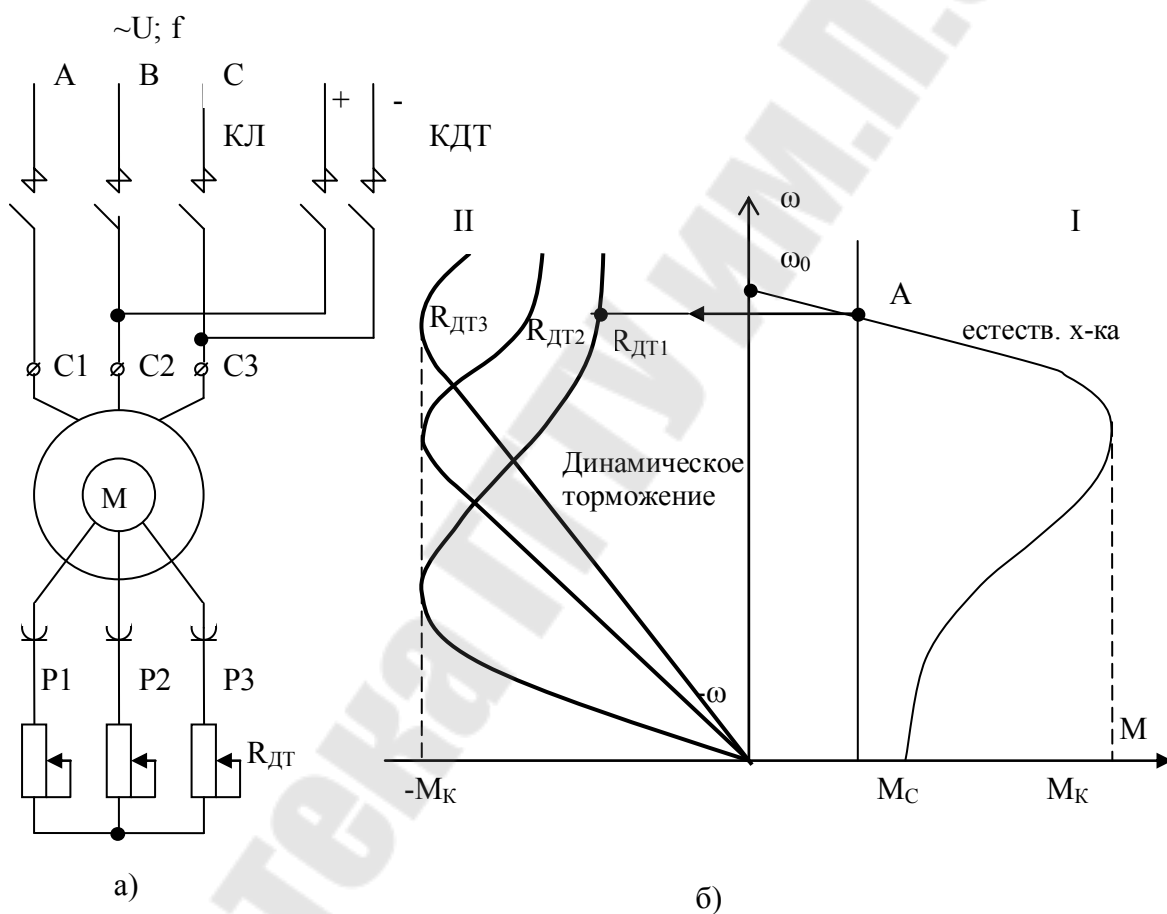


Рис. 2.20. а) схема включения АД с фазным ротором в режиме динамического торможения;
 б) механические характеристики АД с фазным ротором в режиме динамического торможения

Лекция 11

2.9. Механические и энергетические характеристики синхронных двигателей

Синхронные трехфазные двигатели (СД) широко применяются в электроприводах самых разнообразных технологических машин. Схема включения СД приведена на рис. 2.21а, механические характеристики на рис. 2.21б.

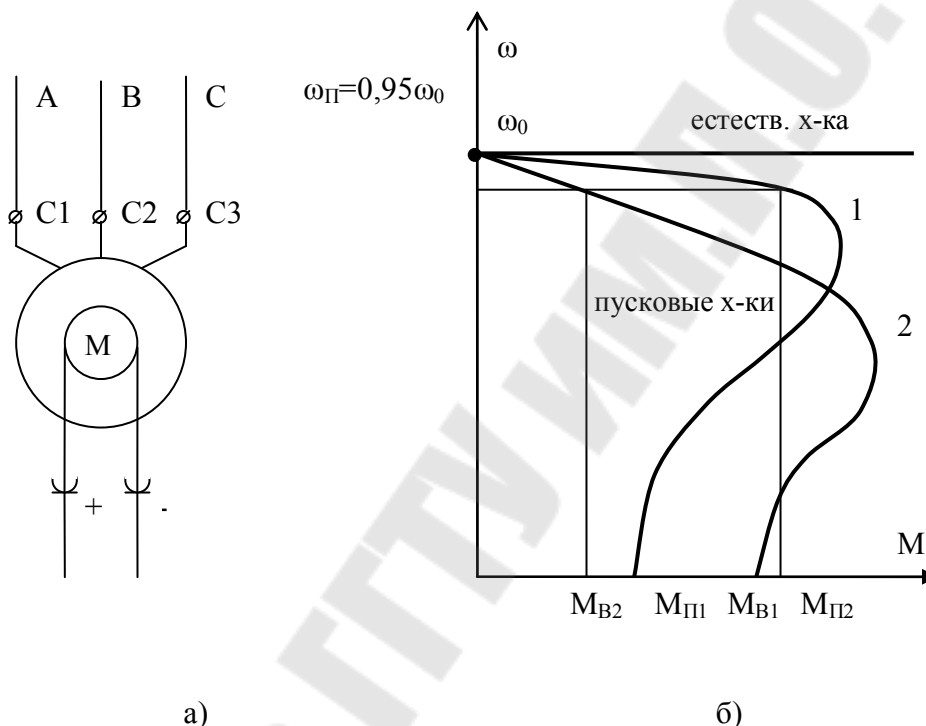


Рис. 2.21. а) схема включения синхронного двигателя;
б) механические характеристики синхронного двигателя в режимах пуска и синхронного вращения

Статор СД выполнен аналогично статору АД - три статорных обмотки расположены на статоре таким образом, что оси создаваемых ими потоков сдвинуты в пространстве на 120° . Подключение начал обмоток статора, которые на рис. 2.21а обозначены как С1, С2, С3, к трехфазной сети переменного тока со сдвигом напряжения между фазами на 120° электрических градусов приводит к появлению магнитного поля, вращающегося с синхронной скоростью $\omega_0 = 2\pi f_1/p$. Здесь p – число пар полюсов статорных обмоток СД; f_1 – частота питающей сети. При $p=1$ вращающееся поле представляет собой два диаметрально противоположно расположенных разноименных полюса северного (N) и южного (S), которые и вращаются со скоростью ω_0 .

Ротор СД выполняется с двумя обмотками: обмоткой возбуждения и короткозамкнутой пусковой обмоткой в виде «беличьей клетки». Обмотка возбуждения питается напряжением постоянного тока и при протекании в ней тока она превращается в электромагнит постоянного тока, разноименные полюса которого в зависимости от скорости вращения могут выполняться как явными, так и неявными, т.е. обмотка возбуждения распределяется по наружной поверхности ротора.

При неподвижном роторе разноименные полюса вращающегося поля статора и ротора не успевают притянуться. Вращающий момент двигателя равен нулю, а в обмотке возбуждения полем статора наводится столь большая э.д.с., что может наступить пробой изоляции обмотки возбуждения.

Для того, чтобы разноименные полюса статора и ротора притянулись (вошли в синхронизм) и при этом не появлялись существенно превышающие номинальные значения броски тока, ротор СД необходимо разогнать до подсинхронной скорости ω_{II} , которая равна $\omega_{II}=0,95\omega_0$. Для этого предназначена пусковая короткозамкнутая обмотка, т.е. СД запускается как АД с короткозамкнутым ротором. Пусковые характеристики АД при различных вариантах пусковой обмотки приведены на рис. 2.21б

У характеристики 1 пусковой момент M_{II1} меньше пускового момента характеристики 2 - M_{II2} , однако момент вхождения в синхронизм $MВ_1$ больше $MВ_2$. Выбор вида пусковой характеристики определяется конкретными условиями работы СД. Обмотка возбуждения СД при пуске закорачивается на разрядное сопротивление, что защищает ее изоляцию от перенапряжений. К источнику напряжения постоянного тока она подключается после того, как скорость ротора ω достигнет подсинхронной ω_{II} .

Пусковая обмотка СД во время пуска интенсивно нагревается, поэтому время тока СД ограничено.

После вхождения СД в синхронизм его скорость при изменении величины момента сопротивления на валу до некоторого максимального значения $M_{макс}$ остается постоянной и равной скорости вращающегося магнитного поля – синхронной скорости ω_0 . Поэтому его механическая характеристика, приведенная на рис. 2.21б, имеет вид прямой, параллельной оси абсцисс. Если M_c превышает $M_{макс}$, то СД может выпасть из синхронизма.

Для определения максимального момента СД M_{\max} , до которого сохраняется синхронная работа СД, служит угловая характеристика СД. Она отражает зависимость вращающего момента M от внутреннего угла СД θ , представляющего собой угол сдвига между осью магнитного поля статора и осью поля ротора. Момент СД представляет собой синусоидальную функцию угла $\theta - M = M_{\max} \sin \theta$. Максимального значения вращающий момент СД достигает при $\theta = \pi/2$. При больших значениях θ величина вращающего момента двигателя уменьшается и поэтому двигатель выпадает из синхронизма. Номинальному моменту двигателя $M_{\text{ном}}$ соответствует номинальный угол $\theta_{\text{ном}} = 25^\circ \div 30^\circ$. При таком значении $\theta_{\text{ном}}$ коэффициент перегрузки СД по моменту $k_{\text{П}} = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 2 \div 2,5$.

Синхронный двигатель может работать во всех режимах электрического торможения. Наиболее часто используется режим динамического торможения. Для его реализации обмотки статора СД отключают от сети и закорачивают на сопротивление динамического торможения $R_{\text{ДТ}}$, а обмотка возбуждения продолжает питаться постоянным током. Механические характеристики СД аналогичны характеристикам АД при динамическом торможении (см. рис. 2.20б).

Торможение противовключением используется редко из-за того, что перевод СД в этот режим сопровождается значительными бросками тока и требует применения сложных схем управления.

Работа системы электроснабжения характеризуется потреблением электроприемниками реактивной мощности. Это вызывает дополнительные потери энергии в элементах системы, снижение уровня напряжения и необходимость иметь повышенную пропускную способность подстанций и распределительных сетей, что снижает экономичность работы системы. В связи с этим для улучшения показателей работы системы электроснабжения необходимо производить компенсацию реактивной мощности, что может осуществляться несколькими способами.

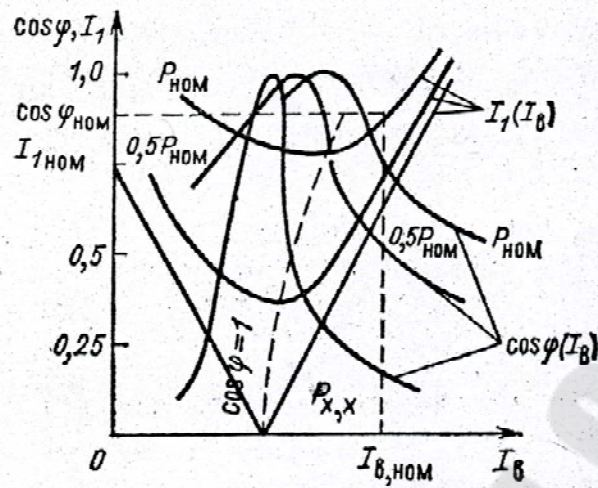


Рис. 2.22. U-образные характеристики СД

Один из эффективных способов компенсации реактивной мощности связан с использованием СД, который за счет регулирования тока возбуждения может осуществлять генерацию реактивной мощности в электрическую сеть. В этом случае СД работает с опережающим коэффициентом $\cos \varphi$. Возможность работы СД в качестве компенсатора реактивной мощности иллюстрируют U-образные характеристики СД, приведенные на рис. 2.22. Эти характеристики показывают зависимости тока статора I_1 и его $\cos \varphi$ от тока возбуждения I_B при $U = \text{const}$ и $P = \text{const}$.

Характеристики $I_1(I_B)$ показывают, что при увеличении от нуля тока возбуждения ток статора вначале уменьшается, что происходит за счет уменьшения его реактивной составляющей. При некотором токе возбуждения она становится равной нулю, а $\cos \varphi = 1$. При дальнейшем увеличении тока возбуждения вновь появляется и увеличивается реактивная составляющая тока статора, но уже с опережающей фазой. Синхронный двигатель начинает работать генератором реактивной энергии с отдачей ее в сеть.

Характеристики рис. 2.22 позволяют выявить также зависимость компенсирующей способности СД от мощности P на его валу. Как видно из рис. 2.22 с ростом мощности P область генерации реактивной мощности (опережающего $\cos \varphi$) смещается в сторону больших токов возбуждения. Другими словами, при неизменном токе возбуждения с изменением мощности на валу отдаваемая в сеть реактивная мощность также меняется.

Из сказанного следует важный вывод: если СД работает с переменной нагрузкой на валу, то для полного использования его компенсирующих свойств требуется регулирование тока возбуждения.

Следует подчеркнуть, что при использовании СД в качестве источника реактивной мощности необходимо обеспечивать повышенные токи возбуждения и увеличивать габаритную (полную) мощность СД, что не является ограничивающим фактором для такого применения СД. Покажем это следующим несложным расчетом.

Запишем отношение полной (габаритной) мощности S к активной мощности P

$$S / P = \sqrt{(P^2 + Q^2) / P} = \sqrt{1 + (Q / P)^2} .$$

Пусть требуется, чтобы реактивная опережающая мощность составляла 40% активной мощности, т.е. $Q/P=0,4$. Расчет выявляет, что при этом отношение S/P составит 1,08, т.е. генерирование указанной реактивной мощности потребует увеличения габаритной мощности только на 8%. Это показывает, что использование СД для компенсации реактивной мощности является выгодным.

При использовании СД для компенсации реактивной мощности обычно требуется рассматривать в комплексе несколько вопросов. Одним из основных является технико-экономическое обоснование использования данного способа компенсации реактивной энергии. Как известно, кроме СД для этой цели могут использоваться также статические компенсирующие устройства (конденсаторы) и синхронные компенсаторы. Среди приемлемых вариантов экономически целесообразным будет тот, который обеспечивает минимум приведенных годовых затрат:

$$Z = K_{н,э} K + C_э = \min,$$

где $K_{н,э}$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений K ; $C_э$ - эксплуатационные расходы.

Если в результате выполненных технико-экономических расчетов выявлена целесообразность использования СД для компенсации определенной реактивной мощности Q , то далее необходимо установить наиболее экономическое ее распределение между отдельными СД. Это достигается отысканием оптимального варианта возбуждения СД, участвующих в компенсации. Под оптимальным вариантом возбуждения СД обычно принимают такое распределение реактивной мощности Q между отдельными СД, при котором суммарные

потери активной мощности, зависящие от выработки и распределения реактивной мощности, минимальны.

На практике распределение реактивной мощности между СД часто производят пропорционально либо их полной номинальной мощности $S_{ном}$, либо пропорционально их активной мощности $P_{ном}$. Этот принцип, как показывают расчеты, дает потери активной мощности, близкие к минимальному значению.

Токи возбуждения отдельных СД, компенсирующих заданную для них реактивную мощность, могут быть определены по кривым $Q(I_B)$, снятым опытным путем.

Раздел 3

Лекция 12

3.1. Принципы автоматического управления пуском и торможением двигателей

Наибольшее распространение во всех отраслях промышленности получили электроприводы, относящиеся к первой группе классификации по функциональному назначению и обеспечивающие автоматическое управление процессами пуска, торможения и реверса двигателей. В таких системах применяют контактные и бесконтактные электрические аппараты релейного действия. В силовых цепях, которые питают обмотки двигателей, используются электромагнитные контакторы переменного и постоянного тока, электромагнитные пускатели, тиристорные переключатели. В цепях управления различные реле времени, напряжения, тока, частоты, мощности и др. Команды на выполнение той или иной операции подаются с помощью кнопочных постов управления и т.п. Кроме этого сигналы на пуск, остановку, реверсирование или изменение скорости двигателя могут поступить в систему управления от путевых или конечных выключателей, датчиков давления, температуры и других датчиков, контролирующих работу технологических машин.

В рассматриваемой группе электроприводов автоматизация процесса пуска наиболее просто осуществляется для АД с короткозамкнутым ротором: после подачи команды на пуск операции управления сводятся к включению обмоток двигателя на полное напряжение сети, т.е. к прямому пуску двигателя. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные двигатели большой мощности (больше 100кВт) запускаются при пониженном напряжении.

При пуске ДПТ и АД с фазным ротором автоматически выключаются ступени пускового реостата из цепи протекания тока якоря или ротора соответственно.

Автоматизация процесса торможения работающего двигателя при любом виде электрического торможения предусматривает выполнение двух основных операций управления: 1 – после подачи команды на торможение совершаются переключения в силовых цепях двигателя, приводящие к изменению направления вращающего момента двигателя, т.е. делающие его тормозным; 2 – в конце торможения при скорости близкой к нулю, двигатель, тормозящийся для остановки, отключается от сети и затормаживается механическим тормо-

зом. В другом случае в главных цепях производятся переключения, необходимые для реверса двигателя, т.е. для разгона в противоположном направлении.

Системы автоматического управления пуском, торможением и реверсом, реализующие указанные ранее операции, конструктивно выполняют в виде комплектных стандартизованных устройств – станций управления. Кроме названного, станции управления обеспечивают возможность регулирования скорости двигателя, т.е. различные по величине скорости установившегося режима работы двигателя. На станциях управления устанавливаются аппараты электрической защиты главных цепей и цепей управления двигателем, командоаппараты, пускорегулировочные и тормозные резисторы, токоограничивающие реакторы и другие элементы располагают чаще всего вне станций управления.

У электрических аппаратов станций управления предусмотрены запасные контакты, которые могут быть использованы для сигнализации и различных блокировок. Возможно также подключение в цепи управления станций контактов конечных выключателей, технологических датчиков и аппаратов других автоматических устройств.

В электрических схемах станций управления широко применяются типовые узлы управления и защиты. Принципы построения типовых узлов рассмотрим на примере реостатного пуска ДПТ с независимым возбуждением с двумя ступенями пускового сопротивления. Схема включения двигателя приведена на рис. 3.1а, диаграмма скорости двигателя ω и тока якоря $I_{я}$ – на рис.3.1б.

В первую очередь подключается к источнику напряжения U_B обмотка возбуждения LM. Ток возбуждения I_B , протекая по LM, создает магнитный поток Φ . после этого к источнику якорного напряжения U подключается якорная цепь двигателя.

При разомкнутых контактах контакторов ускорения КУ1 и КУ2 в момент времени $t=0$ замыкается контакт контактора линейного КЛ. Пусковой ток якоря $I_{я1}$ протекает по обеим ступеням пускового сопротивления $R_{ДП1}$ и $R_{ДП2}$. Если величина пускового сопротивления $R_{П} = R_{ДП1} + R_{ДП2}$ выбрана правильно, то пусковой ток

$$I_{я1} = \frac{U}{R_{я} + R_{д} + R_{ДП1} + R_{ДП2}}$$
 не будет превышать допустимого значения $I_{я1} \leq I_{я доп} \leq 2,5 I_{я н}$.

На якорь двигателя при скорости $\omega=0$ начинает действовать пусковой момент $M_{П}$. Если $M_{П}$ больше момента сопротивления M_c , момент динамический имеет положительную величину

$M_D > 0$, то в соответствии с уравнением движения электропривода при пуске $M_D - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$, величина углового ускорения $\frac{d\omega}{dt}$ будет положительна и скорость вращения якоря двигателя ω будет возрастать.

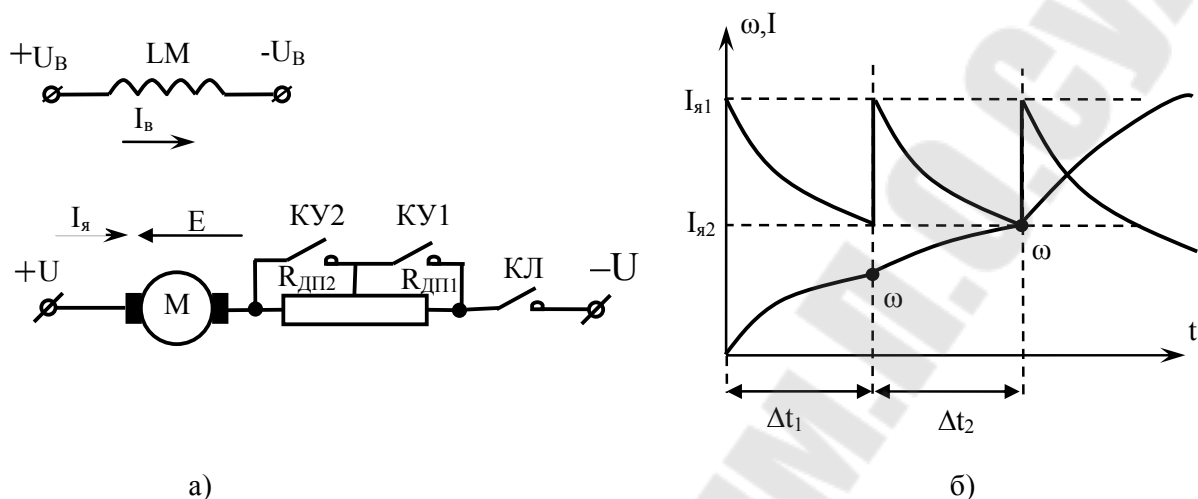


Рис. 3.1. а) схема включения двигателя;
б) диаграмма скорости двигателя ω и тока якоря $I_я$

В обмотке якоря двигателя, вращающейся в магнитном потоке Φ , будет находиться э.д.с. вращения $E = k\omega\Phi$. Как следует из схемы включения двигателя на рис. 3.1а, э.д.с. вращения E по отношению к источнику якорного напряжения U направлена встречно. Поэтому с увеличением ω будет увеличиваться E и уменьшаться якорный ток

$$I_{я1} = \frac{U - E}{R_я + R_д + R_{ДП1} + R_{ДП2}}. \text{ С уменьшением } I_я \text{ будет уменьшаться и}$$

вращающий момент двигателя $M = k\Phi I_я$. Это, в свою очередь приведет к уменьшению динамического момента

$M_D = M - M_c$ и скорости ω . Как следует из диаграммы на рис. 3.1б по истечении промежутка времени Δt_1 двигатель достиг скорости ω_1 , а якорный ток величины $I_{я2}$. Вращающий момент двигателя M стал равным M_c , т.е. $M_D = 0$ и поэтому увеличение скорости вращения якоря двигателя прекратилось. Двигатель из переходного режима работы с $\frac{d\omega}{dt} > 0$ при $\omega = \omega_1$ перешел в установившийся режим с $\frac{d\omega}{dt} = 0$.

Для того, чтобы продолжить разгон, необходимо замкнуть контакт первого контактора ускорения $R_{ДП1}$ КУ1 и зашунтировать первую ступень пускового сопротивления $R_{ДП1}$. При этом якорный ток практически мгновенно увеличится до значения $I_{я1}$, что приведет к появ-

лению положительного M_D и росту скорости. По истечении промежутка времени Δt_2 двигатель достигнет скорости ω_2 , а якорный ток уменьшится до величины $I_{Я2}$. Двигатель перейдет в установившийся режим работы со скоростью ω_2 . Для продолжения разгона необходимо замкнуть контакт второго контактора ускорения КУ2 и шунтировать $R_{ДП2}$. Вновь увеличится $I_{Я}$, появится $M_D > 0$ и продолжится рост скорости, который прекратится при $M = M_c$.

Из графиков изменения во времени скорости и тока ДПТ при реостатном пуске с 2 ступенями пускового сопротивления видно, что автоматическое выключение (шунтирование) ступеней пускового сопротивления должно производиться:

1. через определенные промежутки времени ($\Delta t_1, \Delta t_2$);
2. при определенных значениях скорости (ω_1, ω_2);
3. при определенной величине тока $I_{Я2}$.

Таким образом, автоматическое управление пуском, суть которого заключается в шунтировании ступеней пускового реостата, может быть осуществлен:

- 1 – в функции времени;
- 2 – в функции скорости;
- 3 – в функции тока.

Управление в функции времени предполагает наличие в схеме автоматического управления реле времени, настраиваемых на отсчет заданных выдержек времени.

Управление в функции скорости производится при помощи реле, контролирующих скорость двигателя непосредственно или косвенно.

Управление в функции тока реализуется применением реле минимального тока. Все аппараты подают команды на включение контакторов ускорения.

Управление торможением может производиться в функции тех же самых величин и средств автоматизации, что и при пуске.

Все сказанное справедливо для ДПТ с последовательным возбуждением и АД с фазным ротором.

Лекция 13

3.2. Типовые узлы схем автоматического управления пуском ДПТ

Каждый из принципов автоматического управления пуском и торможением реализуется в схемах электроприводов типовыми узлами.

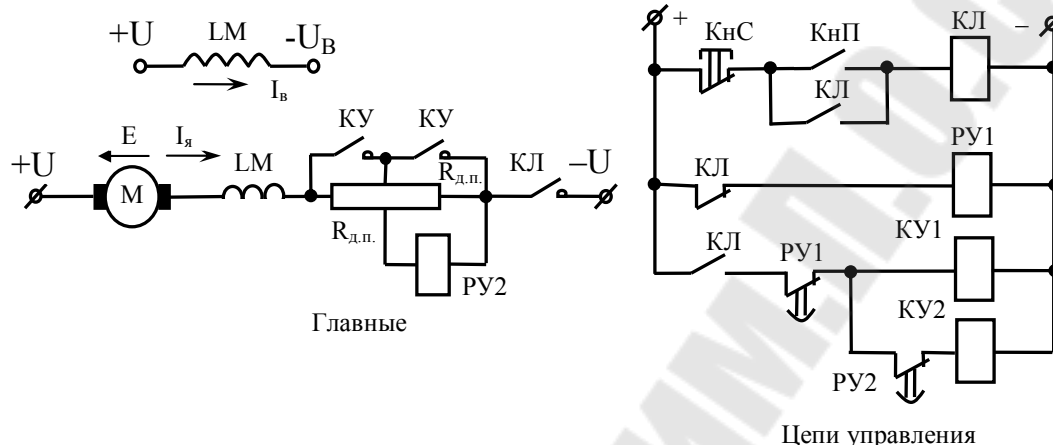


Рис. 3.2. Типовой узел управления пуском ДПТ в функции времени

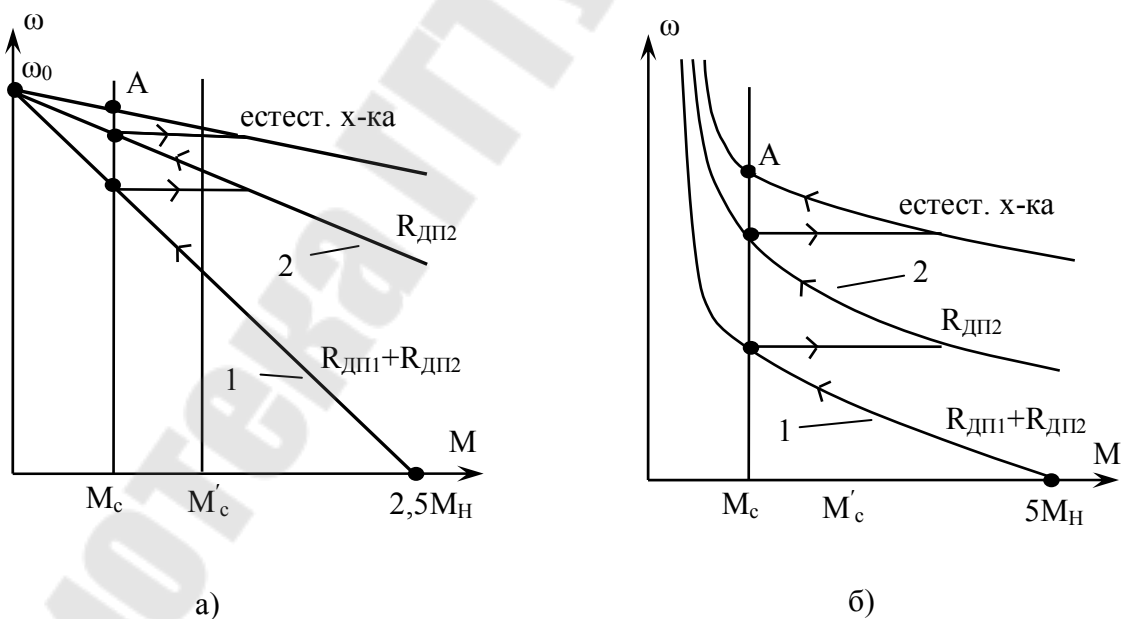


Рис. 3.3. а) механические характеристики ДПТ с независимым возбуждением;
б) механические характеристики ДПТ с последовательным возбуждением

Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск в функции времени ДПТ с независимым и последовательным возбуждением с двумя ступенями пускового сопротивления $R_{ДП1}$ и $R_{ДП2}$ приведен на рис. 3.2. Механические характеристики двигателей, соответствующие схеме включения на рис. 3.2, приведены на рис. 3.3.

При подаче напряжения на главные цепи и цепи управления включается электромагнитное реле времени первой ступени РУ1 и, размыкая свой контакт, исключает возможность включения контакторов ускорения КУ1 и КУ2.

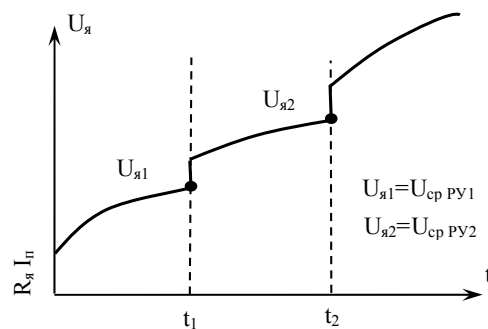
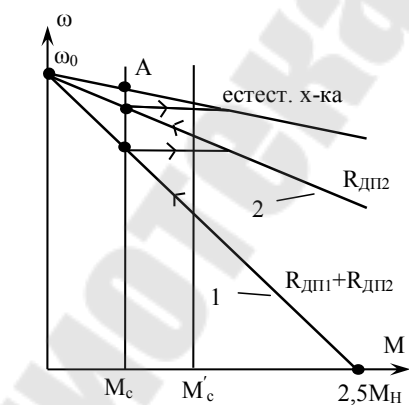
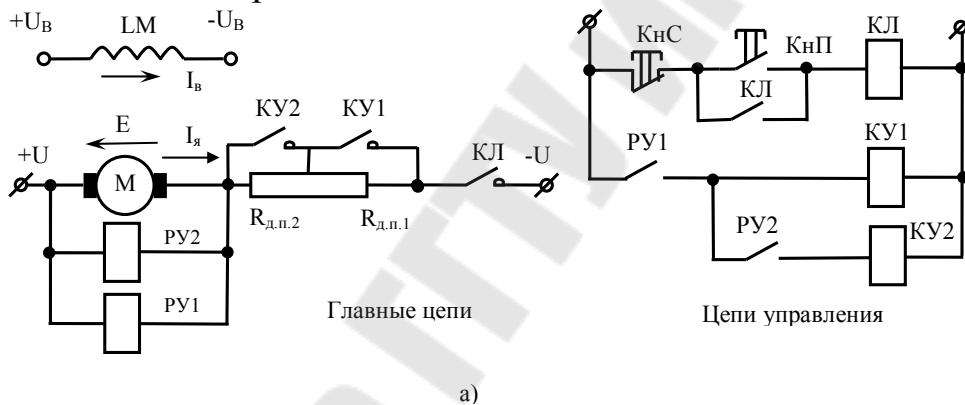
При нажатии на КнП включается КЛ, который своим главным контактом подключает к напряжению якорную цепь двигателя, замыкающими контактами шунтирует КнП (КЛ становится на самопитание) и подготавливает цепь включения КУ, а размыкающим контактом разрывает цепь питания катушки реле РУ1 и реле начинает отсчет выдержки времени. Двигатель начинает разгоняться по реостатной механической характеристике 1. При протекании пускового тока по $R_{ДП1}$ срабатывает реле времени второй ступени РУ2, т.к. падение напряжения от пускового тока на $R_{ДП1}$ велико. Контакт реле РУ2 размыкается в цепи питания катушки контактора КУ2. Реле времени РУ1 по истечении заданной выдержки времени отключается и замыкает свой контакт. Получает питание катушка КУ1. Контактор КУ1 включается и закорачивает $R_{ДП1}$. Двигатель переходит на механическую реостатную характеристику 2. Катушка реле РУ2 теряет питание. Реле РУ2 отсчитав заданную выдержку времени отключается и замыкает свой контакт. Включается КУ2, закорачивает $R_{ДП2}$ и двигатель переходит на естественную характеристику. Достоинство управления в функции времени – простота и надежность реле времени, удобство регулировки их уставок, применение однотипных реле для двигателей различной мощности. Кроме того, при увеличении M_c до величины M_c' и той же выдержке времени реле РУ1 двигатель на первой характеристике разгонится до меньшей скорости, но бросок момента при переключении будет большим. Поэтому средний динамический момент при пуске останется приблизительно тем же и почти не изменится и общее время пуска. При управлении в функции времени в отличие от управления в функции скорости или тока, отсутствует опасность «застревания» двигателя на первой характеристике при $M_c' > M_c$. Все это обусловило широкое распространение управления в функции времени.

Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск ДПТ с независимым возбуждением в функции скорости в две ступени, механи-

ческие характеристики двигателя и диапазона напряжения на зажимах якоря двигателя приведены на рис. 3.4.

Катушки РУ1 и РУ2 подключены на зажимы якоря двигателя, т.е. на напряжение $U_{я}$, которое отличается от E только на величину падения напряжения от тока якоря на сопротивлении якоря $R_{я}$. Следовательно РУ1 и РУ2 являются аппаратами, контролирующими э.д.с. вращения двигателя. Поскольку э.д.с. при постоянном магнитном потоке пропорциональна скорости вращения двигателя ω $E = k\Phi_n\omega$, то рассматриваемый узел осуществляет управление пуском в функции скорости при ее косвенном контроле.

При нажатии КнП включается КЛ. Напряжение на катушках РУ1 и РУ2 мало и равно падению напряжения в якоре от начального броска пускового тока $I_{п}R_{я}$. Поэтому РУ1 и РУ2 сработать не могут, контакторы КУ1 и КУ2 отключены и в цепь якоря введено $R_{дп1} + R_{дп2}$. Двигатель запускается по характеристике 1. По мере увеличения скорости двигателя возрастает E и $U_{я}$.



а) схема включения двигателя;
 б) механические характеристики двигателя;
 в) диаграмма напряжения на зажимах якоря

При $U_{Я1} = U_{ср. РУ1}$ включается РУ1 и включает КУ1, который закорачивает первую ступень сопротивления $R_{ДП1}$. Двигатель переходит на характеристику 2. Скорость двигателя продолжает расти, поэтому возрастает и его э.д.с. При $U_{Я2} = U_{ср. РУ2}$ включается РУ2, контактор КУ2, закорачивающий вторую ступень сопротивления $R_{ДП2}$ и двигатель выходит на естественную характеристику.

Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск ДПТ с независимым возбуждением в функции тока якоря $I_{Я}$ и потока Φ приведена на рис. 3.5.

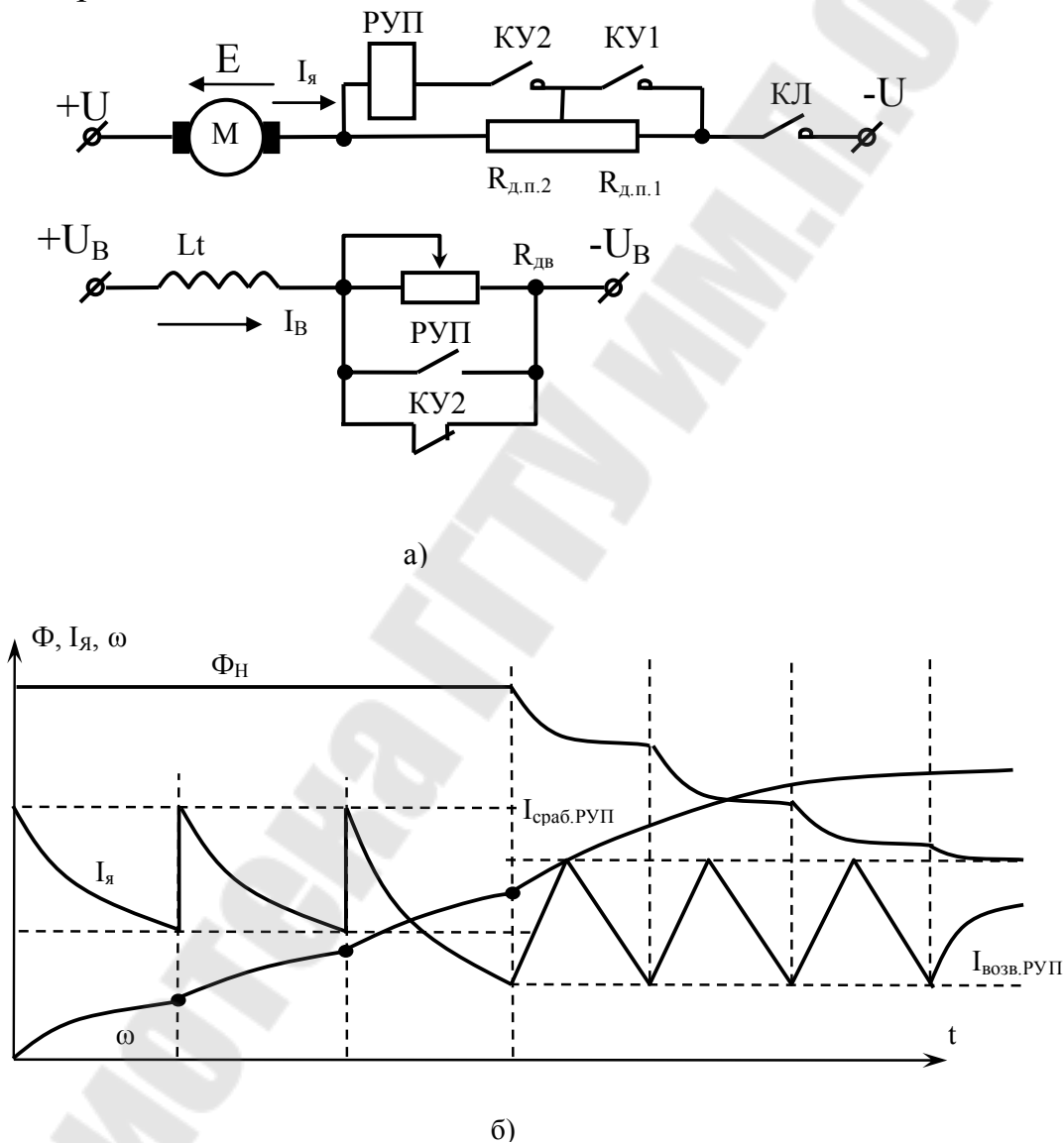


Рис. 3.5. а) схема включения двигателя;
б) диаграмма Φ , $I_{Я}$, ω

Типовой узел применяется при разгоне ДПТ независимого возбуждения путем ослабления магнитного потока для расширения диа-

пазона регулирования ω . На рисунке не показаны цепи управления контакторами КЛ, КУ1, КУ2. пуск до основной скорости может осуществляться одним из рассмотренных способов. Контроль $I_{\text{я}}$ осуществляется токовым реле РУП.

Работа типового узла начитается после включения контактора КУ2 при выходе М на естественную характеристику. При замыкании главного контакта КУ2 от броска якоря срабатывает реле РУП и замыкает свой контакт, шунтирующий реостат возбуждения $R_{\text{ДВ}}$. До этого он был закорочен размыкающим контактом КУ2. Следовательно магнитный поток двигателя Φ сохраняется равным Φ_{H} и двигатель продолжает разгон по естественной характеристике. Когда $I_{\text{я}}$ снизится до $I_{\text{возв РУП}}$, реле РУП отключается, размыкает свой контакт и в цепь ЛМ вводится $R_{\text{ДВ}}$. Происходит ослабление Φ и рост ω . При этом ток якоря увеличивается и , когда он достигнет значения $I_{\text{сраб РУП}}$, контакт реле замыкается. Начинается усиление Φ и снижение $I_{\text{я}}$. Скорость M будет продолжать расти, т.к. за счет увеличения $I_{\text{я}}$ $M > M_{\text{с}}$. При спадаении $I_{\text{я}}$ до величины $I_{\text{возв РУП}}$ реле РУП вновь откроет свой контакт, что повлечет за собой ослабление Φ и т.д. Реле РУП срабатывает несколько раз, прежде чем двигатель достигнет скорости, заданной положением ползунка реостата $R_{\text{ДВ}}$. $I_{\text{я}}$ колеблется в пределах от $I_{\text{возв РУП}}$ до $I_{\text{сраб РУП}}$, поэтому способ управления получил название вибрационного. Он обеспечивается и в том случае, когда ползунок реостата $R_{\text{ДВ}}$ быстро перемещается в сторону ослабления Φ .

Лекция 14

3.3. Типовые узлы схем автоматического управления торможением ДПТ

Управление торможением двигателей производится в функции времени, скорости или тока с применением тех же средств, что и при пуске. Автоматизация процесса торможения при любом его виде предусматривает выполнение двух основных операций:

1 – после подачи команды на торможение в силовых цепях работающего двигателя производятся переключения, в результате которых изменяется направление момента двигателя;

2 – в конце торможения при ω близкой к нулю, М автоматически отключается от сети, либо в силовых цепях производятся переключения, необходимые для реверса.

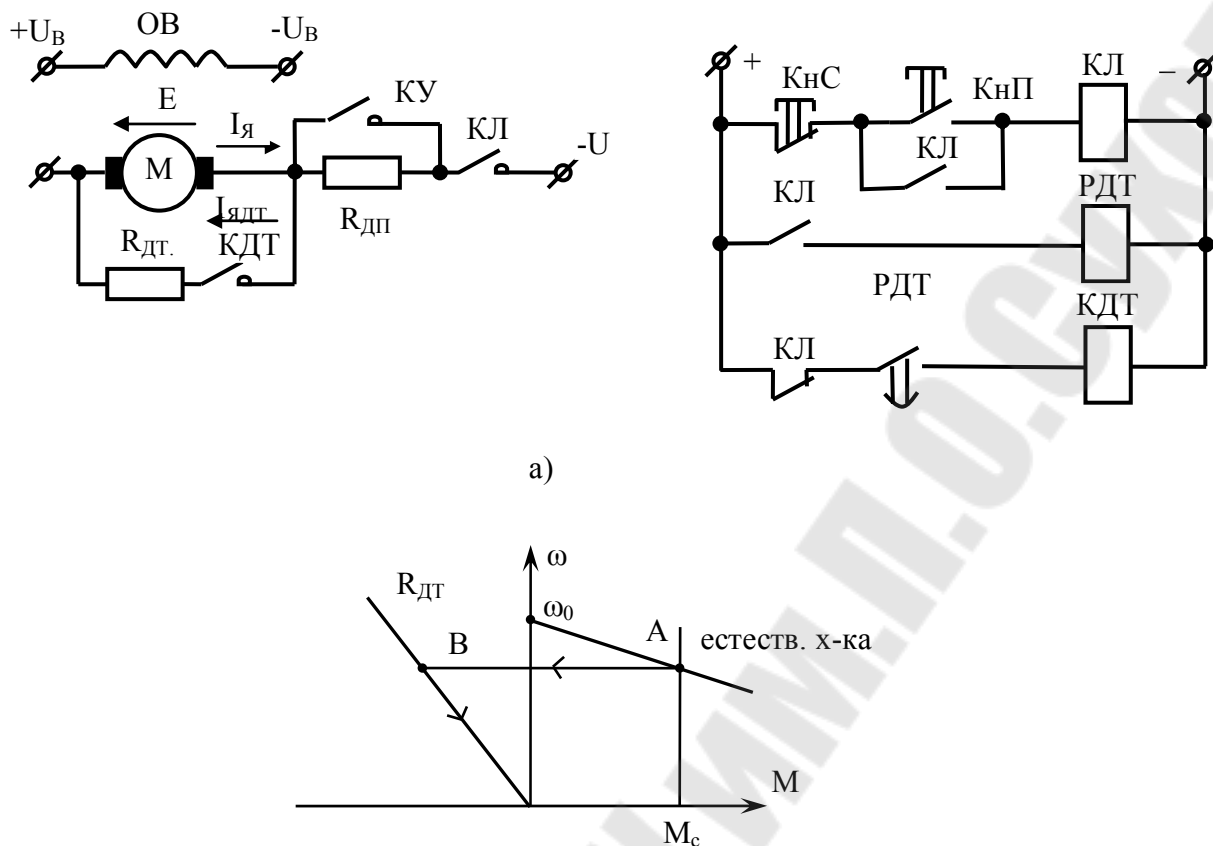


Рис. 3.6. Управление в функции времени динамическим торможением ДПТ: а) схема включения двигателя; б) механические характеристики

Типовой узел, обеспечивающий автоматическое управление динамическим торможением ДПТ с независимым возбуждением в функции времени приведен на рис. 3.6а. Соответствующие схеме включения двигателя механические характеристики изображены на рис. 3.6б. Пуск двигателя показан условно в одну ступень. Управление КУ при пуске может осуществляться одним из ранее рассмотренных методов. По окончании пуска двигатель работает в точке А на естественной характеристике. Направление э.д.с. вращения E и тока якоря $I_{я}$ показано для двигательного режима работы.

При пуске замыкающий контакт КЛ подает питание на катушку реле динамического торможения РДТ и реле срабатывает. Замыкающий контакт РДТ в цепи питания катушки контактора динамического торможения КДТ замкнется. Однако КДТ не включится, т.к. в цепи питания его катушки разомкнут контакт КЛ.

При нажатии на кнопку «стоп» КнС отключится контактор КЛ и якорная цепь двигателя будет отключена от источника якорного на-

пряжения U . Потеряет питание катушка РДТ. Однако реле РДТ, электромагнитное реле времени, останется во включенном состоянии и будет вести отсчеты выдержки времени. Включится контактор КДТ и к зажимам якоря двигателя будет подключено сопротивление динамического торможения $R_{дт}$. В образовавшемся контуре под действием E будет протекать ток динамического торможения $I_{ядт}$, направленный встречно к току двигательного режима $I_{я}$. Поэтому изменит направление и станет тормозным вращающий момент двигателя. Двигатель из точки А перейдет в точку В на характеристике динамического торможения и его скорость будет снижаться. По окончании отсчета выдержки времени реле РДТ отключится, разомкнет свой контакт в цепи питания катушка КДТ и отключит его.

Управление торможением в функции времени применяется только при реактивном M_c . Уставка РДТ должна быть равной или немного большей времени торможения. При активном M_c его увеличение уменьшает действительное время торможения по сравнению с уставкой реле РДТ, что под действием активного M_c вал M всегда должен быть заторможен при помощи механического тормоза.

Автоматическое управление динамическим торможением ДПТ с независимым возбуждением при активном M_c осуществляется в функции скорости при ее прямом или косвенном контроле. Схема типового узла приведена на рис. 3.7.

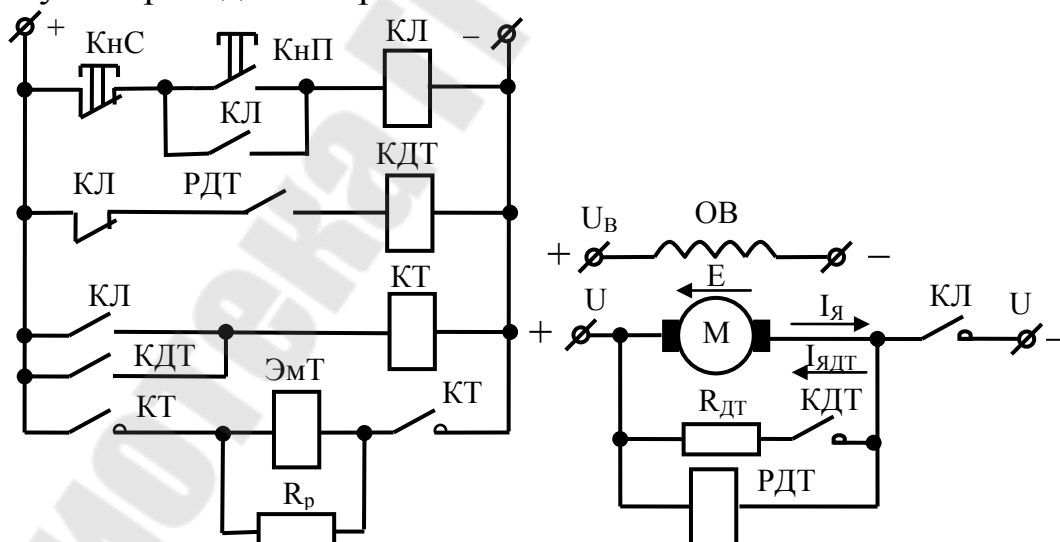


Рис. 3.7. Схема включения ДПТ с независимым возбуждением в режиме динамического торможения

Контроль э.д.с. осуществляется посредством реле напряжения РДТ. Катушка РДТ включена на зажимы якоря двигателя. Пусковые сопротивления и КУ на схеме не показаны. РДТ срабатывает во время пуска при $U_{\text{я}}=0,6\div 0,7U_{\text{н}}$. При отключении КЛ включается КДТ. На зажимы якоря подключается $R_{\text{ДТ}}$ и двигатель тормозится. Когда скорость станет достаточно малой РДТ отпустит якорь и отключит КДТ. Вал двигателя свободен, когда электромагнит тормоза ЭМТ получает питание. Поэтому катушка тормозного контактора КТ получает питание как в двигательном режиме, так и в тормозном. $R_{\text{Р}}$ предотвращает отпадание якоря в процессе переключения КЛ и КДТ.

При реверсивной схеме включения ДПТ с независимым или последовательным возбуждением автоматическое управление процессом торможения противоключением осуществляется в функции скорости при косвенном контроле ее величины по э.д.с. вращения двигателя. Схема включения двигателя приведена на рис. 3.8а. На ней показаны обмотки независимого LM1 и последовательного LM2 возбуждения. Механические характеристики, соответствующие схеме включения двигателя, приведены на рис. 3.8б, а схема цепей управления на рис. 3.8в. В ней используется не кнопочное, а более удобное командоконтроллерное управление. Вертикальные штриховые линии означают фиксированные положения рукоятки командоконтроллера. В данном случае их три: 0 – нулевое (среднее) положение; В – вперед; Н – назад. Точка на штриховой линии под контактом означает, что контакт в данном положении замкнут. В нашем случае команды командоконтроллера КК1 и КК2 в нулевом положении рукоятки разомкнуты; в положении «вперед» замкнут КК1, а КК2 разомкнут; в положении «назад» - наоборот.

Пуск двигателя показан условно в одну ступень в функции времени. Для пуска двигателя в направлении «вперед» необходимо перевести рукоятку командоконтроллера из положения «0» в положение «В». Замкнется контакт КК1 командоконтроллера и получит питание катушка контактора «вперед» КВ: контактор КВ срабатывает и своими главными контактами подключает якорь двигателя к источнику напряжения U . Катушки контакторов противоключения КП и ускорения КУ питания не получают, контакторы отключены и их главные контакты разомкнуты. Пусковой ток протекает по $R_{\text{ДП}}$ и $R_{\text{ДПР}}$. Поэтому двигатель начинает разгон по характеристике противоключения в I квадранте. Появляется падение напряжения от пускового тока на $R_{\text{ДПР}}$ и получает питание катушка реле РУ. Включится реле ускорения РУ и разомкнет свой контакт в цепи питания катушки КУ.

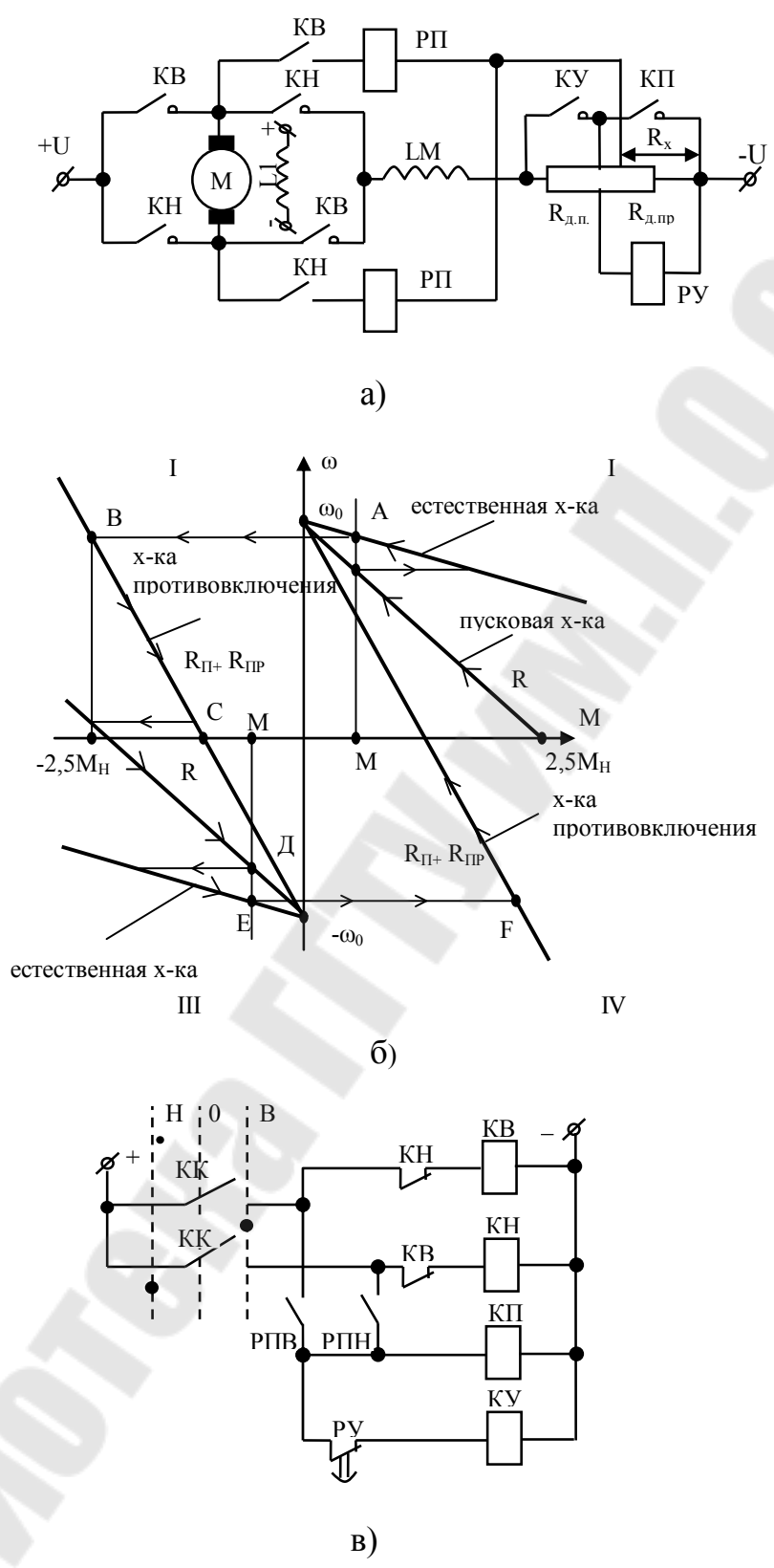


Рис. 3.8. а) реверсивная схема включения ДПТ;
 б) механические характеристики ДПТ с независимым возбуждением; в) схема цепей управления

Замыкающий контакт КВ подает питание на катушку реле противовключения «вперед» РПВ. Реле РПВ срабатывает и своим замыкающим контактом подает питание на катушку КП. Контакт КП срабатывает и своим главным контактом шунтирует $R_{ДПР}$. Двигатель с характеристики противовключения переходит на пусковую характеристику. Одновременно с этим теряет питание катушка РУ и реле начинает отсчет выдержки времени. По окончании выдержки времени реле РУ отключится, его контакт в цепи питания катушки КУ замкнется и контактор ускорения КУ сработает. Главный контакт КУ замкнется и зашунтирует $R_{ДП}$. Двигатель перейдет на естественную характеристику, где будет работать в точке А.

Для перевода двигателя в режим торможения противовключением необходимо рукоятку командоконтроллера из положения «В» перевести в положение «Н». При переходе рукоятки через положение «0» оба контакта командоконтроллера оказываются разомкнутыми, поэтому катушки КВ, КП, КУ теряют питание и контакторы отключаются. В цепь протекания якорного тока включаются $R_{ДП}$ и $R_{ДПР}$, т.е. двигатель подготавливается к режиму торможения противовключением. В положении рукоятки «Н» замыкается контакт КК2. Получает питание катушка контактора «назад» КН и контактор КН срабатывает. Главные контакты КН замыкаются и изменяют полярность напряжения на зажимах якоря двигателя. Изменяется направление якорного тока и вращающего момента двигателя. Он становится тормозным. Двигатель из точки А переходит в точку В на характеристике противовключения. Замыкающий контакт КН в цепи питания катушки реле противовключения «назад» РПН замкнется, однако реле РПН не включится. Это обеспечивается подключением правого по схеме вывода катушки РПН, т.е. величиной R_{xx} . Катушки КП и КУ питание не получают, контакторы отключены и двигатель тормозится по характеристике противовключения. Реле РУ включено и его контакт в цепи питания катушки КУ разомкнут.

С уменьшением скорости двигателя напряжение на катушке РПН увеличивается. При скорости, близкой к нулю, РПН включится и своим замыкающим контактом подает питание на катушку КП. Контакт КП сработает и своим главным контактом зашунтирует $R_{ДПР}$. Двигатель перейдет на пусковую характеристику. Потеряет питание катушка РУ и реле начнет отсчет выдержки времени. Двигатель по пусковой характеристике затормозится и сразу же начнет разгон в направлении «назад». По окончании выдержки времени РУ отклю-

чится и включит КУ. Главный контакт КУ шунтирует $R_{ДП}$, двигатель перейдет на естественную характеристику, где будет работать в точке Е.

Для ДПТ с последовательным возбуждением процессы аналогичны. Соответствующие характеристики приведены на рис. 2.13а.

Напряжение на катушке РПВ(Н) определится из соотношения $U_{РПВ} = U - I_{я}R_x$; Ток при торможении противовключением определяется как

$$I_{я} = \frac{U + E}{R_{ДП} + R_{ДПР}} = \frac{U + \kappa\Phi\omega}{R_{ДП} + R_{ДПР}}.$$

Решая совместно два последних выражения, найдём зависимость напряжения на катушке реле РПВ от скорости

$$U_{РПВ} = U - \frac{U + \kappa\Phi\omega}{R_{ДП} + R_{ДПР}} R_x.$$

Величина U , $R_{ДП}$, $R_{ДПР}$, Φ и $R_x = const$, поэтому $U_{РПВ}$ будет линейно зависеть от скорости ω .

Рассчитать точку присоединения РПВ, т.е. величину R_x , можно из условия, что при максимальной угловой скорости напряжение на катушке РПВ равно нулю

$$U_{РПВ} = U - I_{я}R_x = 0; \text{ отсюда } R_x = \frac{U}{I_{я}};$$

ток в начале торможения будет равен

$$I_{я} = \frac{U + E_{\max}}{R_{ДП} + R_{ДПР}}.$$

тогда

$$R_x = \frac{U(R_{ДП} + R_{ДПР})}{U + E_{\max}}.$$

Т.к. $U \approx E_{\max}$ получим $R_x = 0,5(R_{ДП} + R_{ДПР})$

Напряжение на катушке РПВ при уменьшении скорости возрастает. При $\omega = 0$ и $R_x = 0,5R$ имеем

$$U_{РПВ} = U - \frac{U + \kappa\Phi\omega}{R} R_x = U - \frac{U \cdot 0,5(R_{ДП} + R_{ДПР})}{R_{ДП} + R_{ДПР}} = 0,5U.$$

Таким образом, если точку присоединения РП выбрать в соответствии с $R_x = 0,5R$ а напряжение срабатывания $U_{ср.РП} = 0,5U$, то будет обеспечен рассмотренный выше порядок работы схемы.

Рассматриваемая схема полностью симметрична, поэтому полученные результаты справедливы как для реле РПВ так и для реле РПН.

Лекция 15

3.4. Типовые узлы схем автоматического управления пуском двигателей переменного тока.

Графики изменения во времени скорости и тока двигателя на рис. 3.1, построенные для ДПТ справедливы и для АД с фазным ротором, т.к. рабочая часть механической характеристики АД линейна как и механическая характеристика ДПТ с независимым возбуждением; с ростом сопротивления в цепи ротора наклон рабочей части характеристик к оси абсцисс увеличивается. Поэтому автоматическое управление пуском и торможением двигателей переменного тока осуществляется в функции тех же величин и с использованием аналогичных электрических аппаратов.

Типовой узел, обеспечивающий автоматический пуск АД с фазным ротором в две ступени в функции времени, приведен на рис. 3.9.

Цепи управления питаются от сети постоянного тока. При большой частоте включения двигателя используют контакторы переменного тока с катушками постоянного тока и электромагнитные реле времени, электрические аппараты постоянного тока. Схема отличается от схемы управления пуском ДПТ лишь тем, что катушка реле времени РУ2 включена в цепь управления через размыкающий контакт КУ1. Таким образом РУ2 включается при подаче напряжения на схему, а отсчёт выдержки времени начинается РУ2 с момента размыкания контакта контактора КУ1.

Для СД всегда применяют асинхронный пуск. Поэтому в статорных цепях СД осуществляются так же переключения, как и при пуске АД: – статорные обмотки включаются на полное напряжение (прямой пуск) либо на пониженное напряжение с последующим переключением в функции времени на полное.

Специфическая особенность пуска СД – управления подачей в обмотку возбуждения постоянного тока от возбудителя. В качестве последних используют генераторы постоянного тока или тиристорные преобразователи. Для быстроходных СД вал возбудителя соединяют с валом двигателя, для тихоходных СД привод возбудителя выполняют на основании АД с короткозамкнутым ротором.

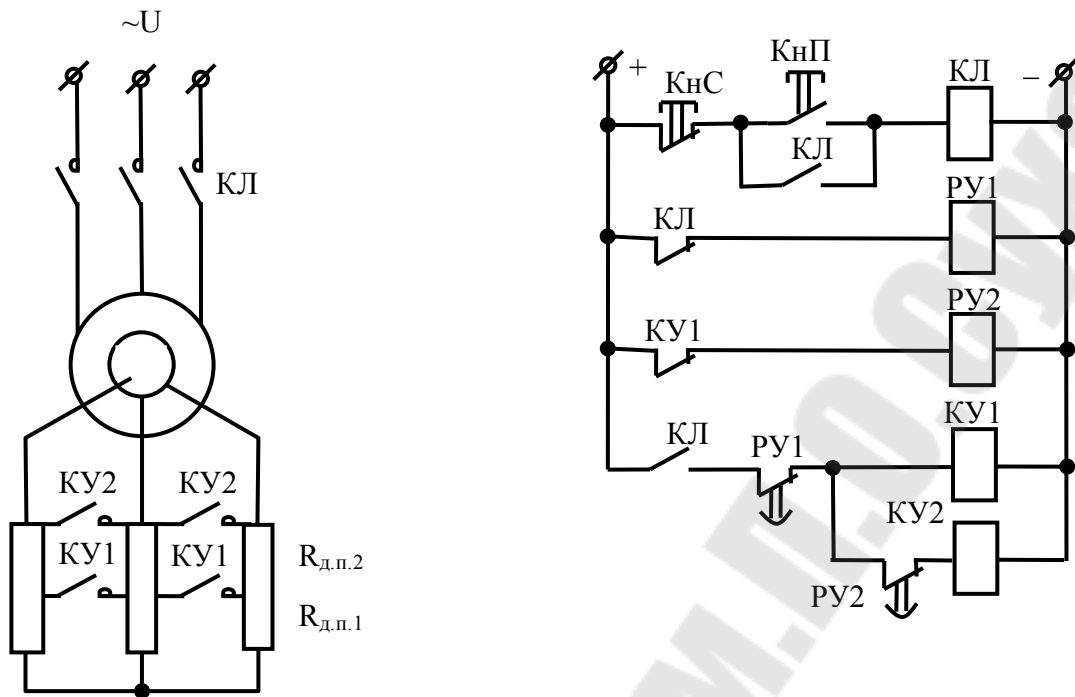


Рис. 3.9. Схема включения АД с фазным ротором

Если позволяют питающая сеть и двигатель, то применяют прямой пуск с постоянно подключённым возбудителем при M_c на валу СД не превышающем $0,4M_n$. Если $M_c > 0,4M_n$, то возбудитель подключается на подсинхронной скорости.

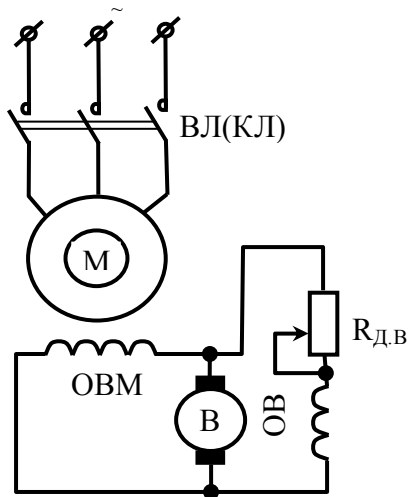
При пуске на пониженном напряжении различают: «лёгкий» пуск, при котором возбуждение подаётся до включения обмотки статора на полное напряжение (при небольшом M_c) и «тяжёлый» пуск – подача возбуждения происходит при полном напряжении на обмотке статора (при значительном M_c).

На рисунке 3.10.а – схема прямого пуска с наглухо подключённым возбудителем В. Управление пуском состоит во включении линейного выключателя ВЛ или контактора КЛ. По мере разгона M напряжение В растёт, растёт и ток возбуждения. При подсинхронной скорости он оказывается достаточным для вхождения M в синхронизм.

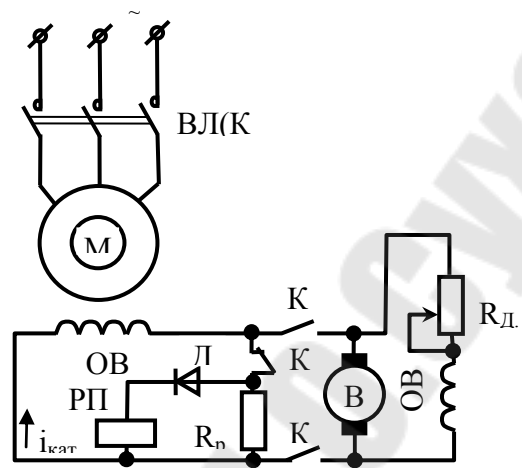
Схемы на рисунке 3.10.б и 3.10.в применяют при более тяжёлых условиях пуска. Начинается пуск с включения ВЛ (КЛ). Обмотка возбуждения ОВМ либо замкнута на разрядное сопротивление R_p , либо подключена к возбудителю последовательно с R_p . Подачей возбуждения можно управлять в функции скорости (скольжения) или тока статора M . Первый способ рис. 3.10.б. реализуют при помощи электромагнитного реле времени постоянного Его катушка включена через

диод D на часть R_p . При подключении обмотки статора M к сети в обмотке возбуждения наводится переменная э.д.с. По катушке РПВ начнёт протекать выпрямленный диодом ток $i_{кат}$ в виде импульсов, амплитуда и частота которых пропорциональны скольжению s . В самом начале пуска, когда $s=1$, амплитуды импульсов тока $i_{кат}$ достаточно велики а временные интервалы между ними малы, поэтому РПВ включится. По мере разгона M амплитуда импульсов уменьшается, а временные интервалы между ними увеличиваются. При подсинхронной скорости эти интервалы станут равными времени выдержки и РПВ отключится. Его контакт замкнётся и включит КВ. Из-за разброса выдержек РПВ схема не обеспечивает чёткого вхождения M в синхронизм.

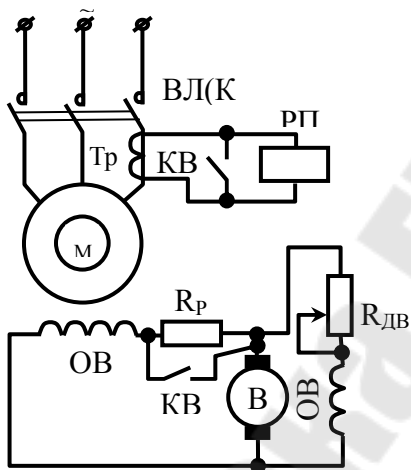
В основном применяют управление в функции тока статора M (рис. 3.10.в.). Токовое реле РПВ получает питание от трансформатора тока TrT , включённого в фазу статорной цепи. Известно, что при асинхронном пуске ток статора в зоне подсинхронной скорости резко уменьшится. Это обстоятельство и используют для фиксации момента подачи возбуждения. При нажатии на КнП срабатывает КЛ. От броска пускового тока срабатывает и РПВ. Его размыкающий контакт в цепи катушки КВ размыкается, и замыкающий контакт включает блокировочное реле РБ. РБ становится на самопитание и подготавливает цепь включения КВ. На подсинхронной скорости ток статора снижается, РПВ отключается. Включается КВ. Его контакты закорачивают R_p и катушку РПВ, чтобы РПВ не сработало от броска тока статора при вхождении M в синхронизм.



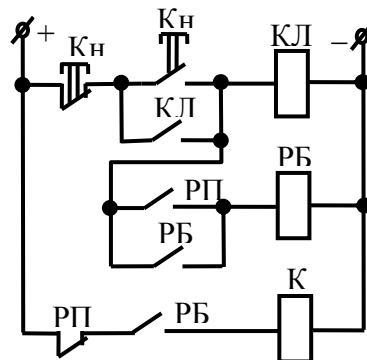
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.10. а) схема прямого пуска;
 б) схема пуска в функции скорости;
 в) схема пуска в функции тока;
 г) схема цепей управления

Лекция 16

3.5. Типовые узлы схем автоматического управления торможением двигателей переменного тока

Типовой узел, обеспечивающий автоматическое управление динамическим торможением АД с фазным ротором в функции времени, приведен на рис. 3.11.

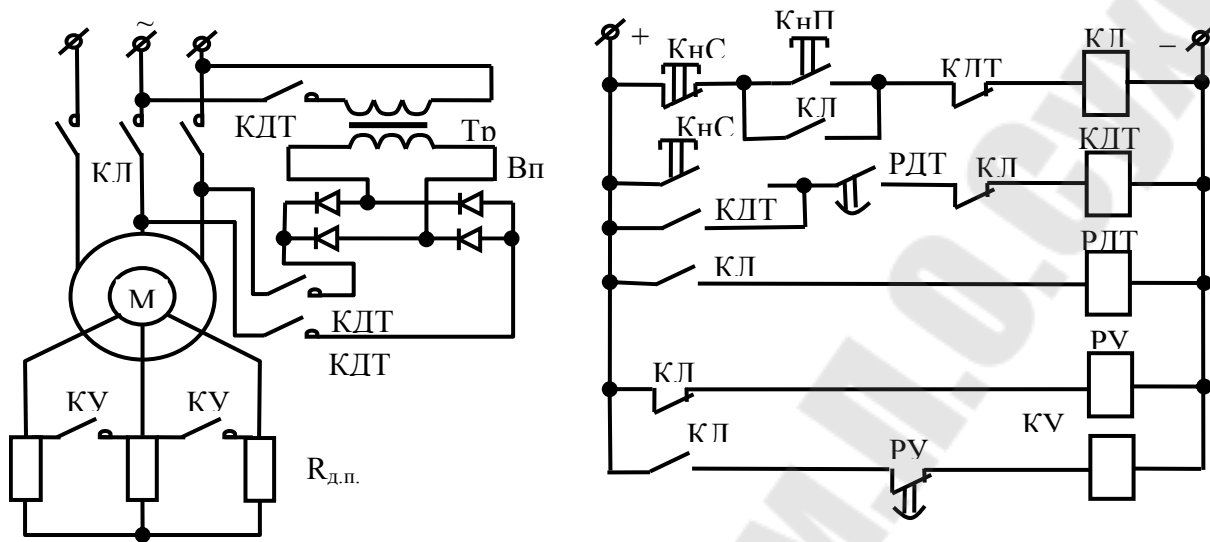


Рис. 3.11. Схема включения АД с фазным ротором в режиме динамического торможения

Узел применяется при отсутствии цепи постоянного тока. Две обмотки статора питаются через выпрямитель Вп. Управление пуском условно показано в одну ступень в функции времени. При работе *М* включены КЛ и КУ. Реле времени РДТ также включено и его контакт в цепи катушки *КДТ* замкнут. При нажатии на *КнС* КЛ и КУ отключаются. Статор отключается от сети. В ротор вводится *R_{д.п.}*. Замыкающий контакт *КнС* включает *КДТ*, который своими главными контактами подключает две обмотки статора к выпрямителю Вп. *М* переходит в режим динамического торможения. Теряет питание катушка РДТ. После окончания выдержки времени размыкается замыкающий *РДТ* в цепи катушки *КДТ* и *КДТ* отключается. Торможение заканчивается. Условия применения как и для ДПТ. При наличии сети постоянного тока обмотки статора питаются непосредственно от сети через добавочное сопротивление и два замыкающих главных контакта *КДТ*.

Автоматическое управление процессом торможения противовключением АД с короткозамкнутым ротором осуществляется с помощью реле контроля скорости РКС. Схема типового узла приведена на рис. 3.12.

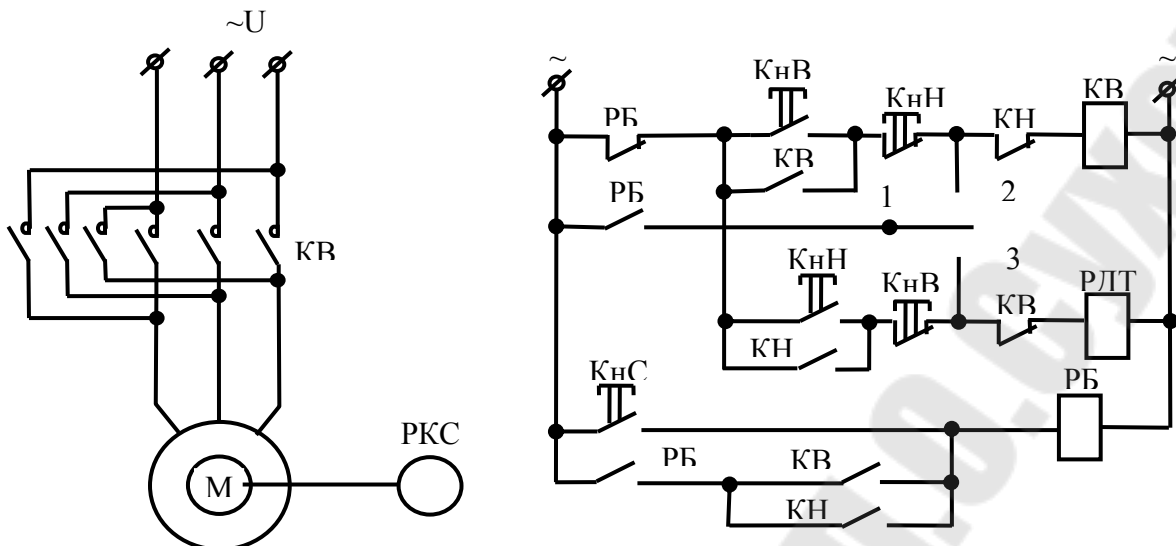


Рис. 3.12. Схема включения АД с короткозамкнутым ротором в торможении противовключением

Схема применяется для остановки реверсивного двигателя. При работе двигателя переключающий контакт реле контроля скорости РКС в зависимости от направления вращения находится в положении 1–3 («вперёд») или 1–2 («назад»). Введение РКС в действие осуществляется только при подаче команды на остановку. Это обеспечивается блокировочным реле РБ. В остальном эта схема обеспечивает управление реверсивным АД с к.з. ротором. Допустим, что M работал в направлении «вперёд», т.е. был включен КВ и переключающий контакт РКС замкнут в положении 1–3. При нажатии на КнС включается РБ. Размыкающий контакт РБ отключает КВ, а замыкающий контакт РБ через контакты 1–3 РКС и замкнувшийся контакт КВ включит КН. Кнопка КнС может быть отпущена т.к. РБ становится на самопитание. Двигатель переходит в режим торможения переключателем. При $\omega \approx 0$ размыкается контакт 1–3 реле РКС и статор отключается от сети. При вращении двигателя в направлении «назад» и нажатии на КнС схема действует аналогично.

Если необходимо реверсировать M без остановки, то нажимают на кнопку противоположного направления. Например, M работал в направлении «вперёд». При нажатии на КнН её размыкающий контакт отключит КВ, а затем включится КН. M переходит в режим торможения противовключением, а потом разгоняется в направлении «назад», т.к. катушки КН продолжают получать питание через размыкающий контакт РБ до тех пор, пока не будет нажата кнопка КнС. При помощи РКС можно управлять и динамическим торможением АД.

Схема будет аналогична рассмотренной. Вместо замыкающего контакта реле РДТ в цепи питания катушки КДТ необходимо включить размыкающий контакт РКС.

Типовой узел, обеспечивающий управление процессом торможения противовключением АД с фазным ротором при косвенном контроле скорости двигателя приведен на рис. 3.13.

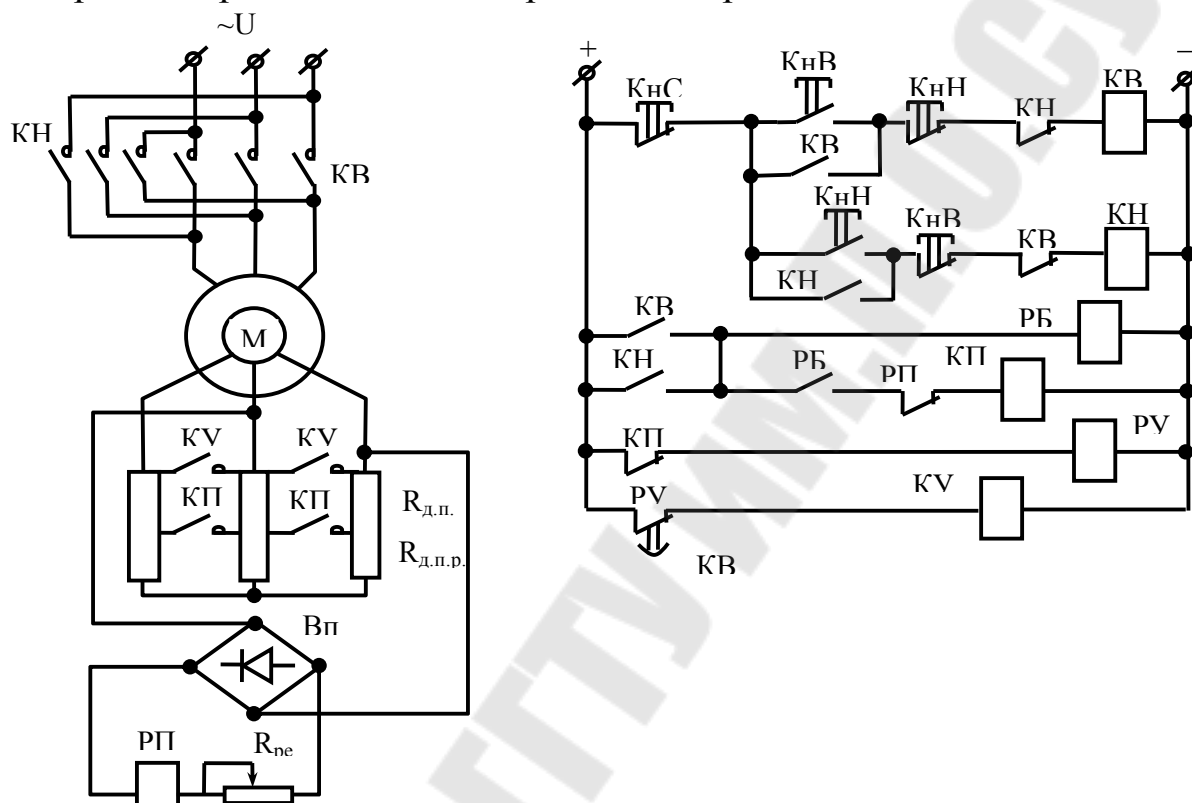


Рис. 3.13. Схема включения АД с фазным ротором в режиме торможения противовключением

Косвенный контроль скорости M осуществляется с помощью реле противовключения РП. Его катушка через Вп подключена на зажимы обмотки ротора. Напряжение на катушке РП пропорционально скольжению s двигателя: $U_{pn} \approx E_{2n}s$, где E_{2n} – э.д.с. ротора при $s=1$. С помощью $R_{РЕГ}$ реле настраивается так, чтобы оно срабатывало в самом начале процесса торможения, т.е. при $s \approx 2$ и отпускало свой якорь при скорости, близкой к нулю, т.е. при $s \approx 1$. При пуске РП не включится. На схеме цепи управления пуском представлены одной ступенью $R_{ДП}$, контактором КУ и электромагнитным реле времени РУ. Отсчёт времени РУ начинает с момента включения КП.

Предположим, что M работал в направлении «вперёд». При нажатии на КнН отключаются контакторы КВ и КП. В цепь ротора вво-

дится $R_{ДП}+R_{ДПР}$. Затем включится КН и M переходит в режим торможения противовключением. При этом включается РП и размыкает свой контакт в цепи катушки КП, не позволяя ему включиться и обеспечивая в цепи ротора $R_{ДП}+R_{ДПР}$. Для повышения надёжности этой операции применяют блокировочное реле РБ. Оно отключается при отключении КВ и включится только после срабатывания КН. Тем самым создаётся временный разрыв в цепи катушки КП. Когда контакт РБ замкнется, реле РП уже успеет сработать и разомкнуть свой контакт. В конце торможения контакт РП замыкается, включается контактор КП. Двигатель переходит на реостатную характеристику и разгоняется в направлении «назад». При обратном реверсе схема работает аналогично. При нажатии на КНС M отключается от сети и тормозится под действием M_c .

Лекция 17

3.6. Узлы электрической защиты двигателей и схем управления

Для предотвращения выхода из строя и повышения надёжности ЭП применяют различные виды электрических защит.

Максимально–токовая защита. При к.з. обеспечивает немедленное отключение цепи, в которой произошло к.з. Осуществляется: предохранителями с плавкими вставками Пр; автоматами с электромагнитными расцепителями В; максимальными токовыми реле РМ1 и РМ2. При мощности M до 10 кВт цепи управления защищают при к.з. теми же аппаратами, что и силовые цепи либо своими Пр и В. Примеры включения аппаратов защиты приведены на рис. 3.14.

Номинальный ток плавкой вставки $I_{вст.н.}$ и ток срабатывания $I_{уст.}$ В и РМ для защиты АД с к.з. ротором с начальным пусковым током I_n : $I_{вст.н.} \geq 0,4I_n$, при $t_n < 5c$ – лёгкий пуск; $I_{вст.н.} \geq (0,5-0,6)I_n$; $I_{уст.} = (1,3-1,5)I_n$.при $t_n > 10c$ – тяжёлый пуск.

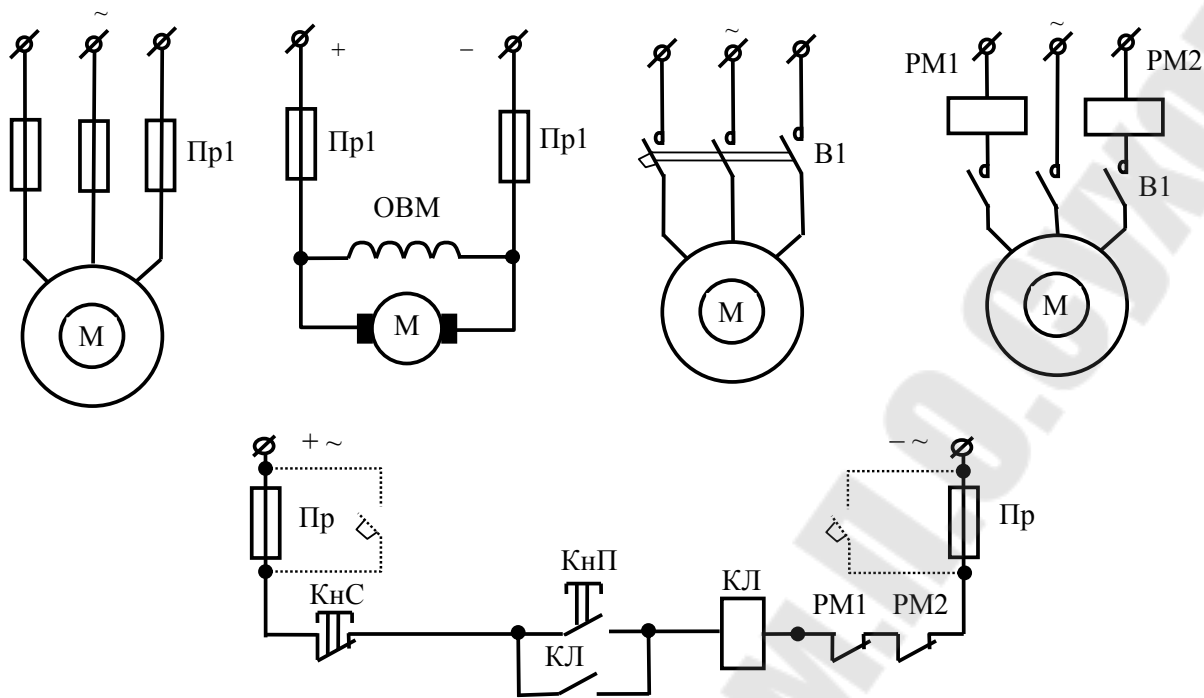


Рис. 3.14. Схемы включения аппаратов защиты от токов короткого замыкания

Для защиты АД с фазным ротором и ДПТ $I_{вст.н.} = (1-1,25)I_n$; $I_{уст.н.} = (1,2-1,3)I_n$. Значение номинального тока I_n для двигателей S3 – режима берут при $ПВ=25\%$. Для защиты цепей управления $I_{вст.н.} = I_{уст.н.} = 2,5I_{кат.Σ}$, $I_{кат.Σ}$ – максимальный суммарный ток одновременно включённых аппаратов.

Защита двигателей от перегрева, вызванного перегрузкой по току осуществляется: при продолжительном режиме работы – с помощью двух тепловых реле или В с тепловыми расцепителями (ДПТ–1реле); при S3 режиме работы – с помощью двух PM1 и PM2, поскольку в S3 режиме трудно согласовать тепловые характеристики. В этом случае одновременно обеспечивается защита M от работы на двух фазах. Примеры включения аппаратов защиты приведены на рис. 3.15.

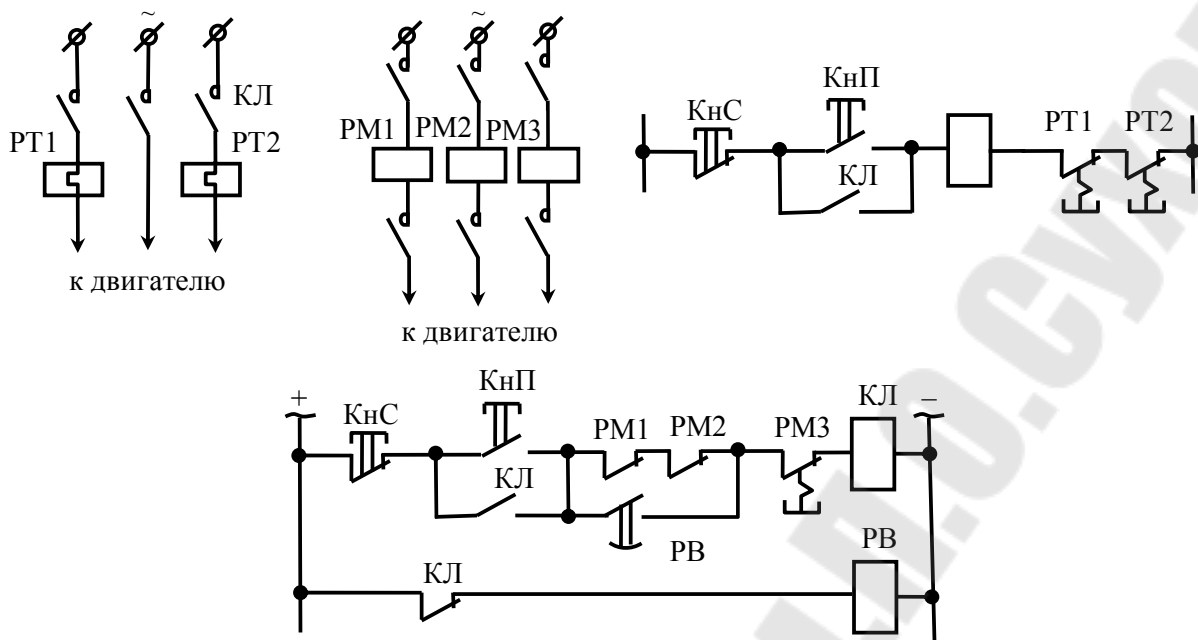


Рис. 3.15. Схемы включения аппаратов тепловой защиты

Реле РВ исключает возможность срабатывания РМ1 и РМ2 при пуске. РМ3 служит для защиты при к.з. Номинальный ток нагревательного элемента теплового реле $I_{нагр.н.}$ или теплового расцепителя В $I_{расц.н.}$ выбирают из условия $I_{нагр.н.} = I_{расц.н.} \approx I_n$. Ток уставки РМ $I_{3ф} < I_{уст.} < I_{2ф}$; где $I_{3ф}$ и $I_{2ф}$ – токи M при работе на двух и трёх фазах.

Защита от самозапуска (нулевая защита). Обеспечивает отключение двигателя при исчезновении или чрезмерном снижении напряжения сети и предотвращает самозапуск - самопроизвольный пуск M после восстановления напряжения. При кнопочном управлении её осуществляет КЛ. При управлении с помощью командоконтроллера – реле напряжения РН. В этом случае пуск возможен только после установки КК в нулевое положение. В цепь катушки РН включаются контакты других аппаратов защиты. Если, наоборот, требуется обеспечить самозапуск M , то кнопки управления заменяют выключателями.

Защита при обрыве поля, т.е. при обрыве цепи обмотки возбуждения ДПТ и СД осуществляется при помощи минимального токового реле РОП. При обрыве в цепи ОВМ РОП выключается и включает M . Защита от перенапряжения на ОВМ при её отключении осуществляется разрядным сопротивлением $R_{рд}$ устраняет потери энергии при работе.

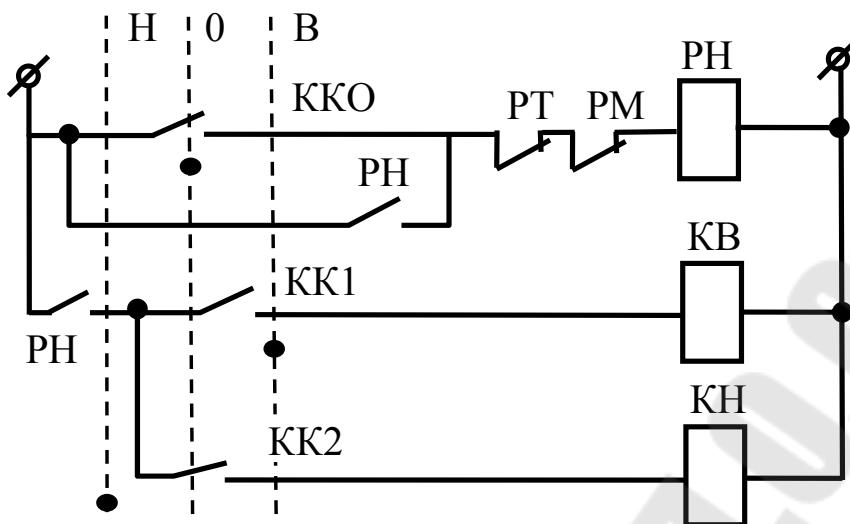


Рис. 3.16. Схема включения защиты от самозапуска

Защиту от затянувшегося пуска СД, схема которой приведена на рис. 3.18, выполняют при помощи РОП и реле времени РВ. Защита необходима, т.к. пусковая обмотка рассчитана на кратковременный режим работы. Выдержка РВ соответствует допустимой продолжительности пуска. Если к моменту срабатывания РВ ток возбуждения не достиг своего номинального значения и РОП не включилось, то РП срабатывает и двигатель отключится.

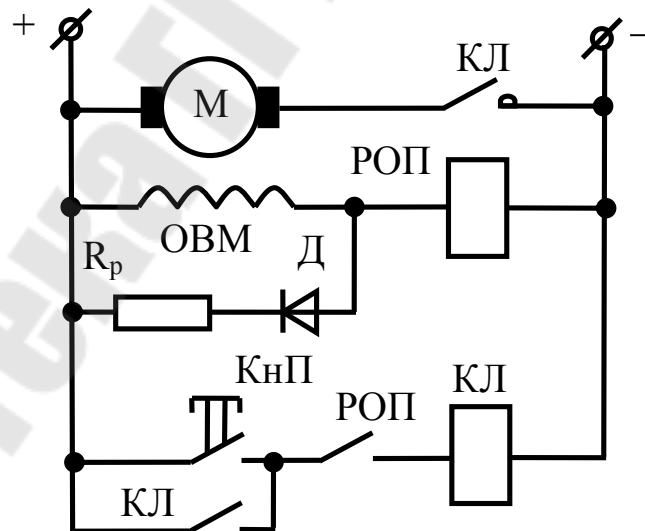


Рис. 3.17. Схема включения защиты от обрыва поля

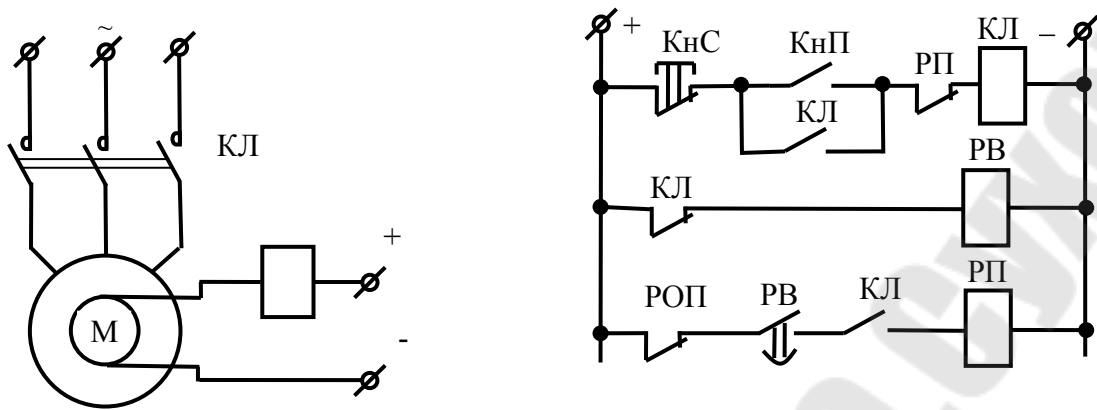


Рис. 3.18. Схема включения защиты от затынувшегося пуска СД

Защита от выпадания из синхронизма СД, схема которой приведена на рис. 3.19, применяется для двигателей с резко изменяющейся нагрузкой на валу. Для сохранения перегрузочной способности M при снижении напряжения сети на $15\text{--}20\%$ отключится реле минимального напряжения РФ. Замыкается его контакт и включает контактор фазировки КФ. Последний своим контактом шунтирует реостат $R_{дв}$ в цепи ОВВ. Напряжение возбuditеля, ток возбуждения и максимальный момент двигателя возрастают.

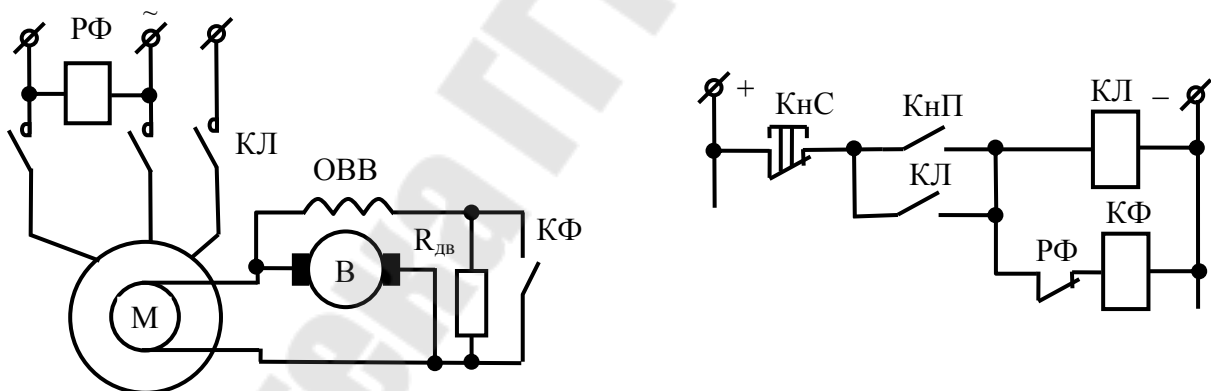


Рис. 3.19. Схема включения защиты СД от выпадания из синхронизма

Логвин Владимир Васильевич

**ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ
И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ**

**Пособие
по одноименной дисциплине
для слушателей специальности 1-70 05 75
«Трубопроводный транспорт, хранение
и реализация нефтегазопродуктов»
заочной формы обучения**

Подписано в печать 17.12.15.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 5,35. Уч.-изд. л. 5,11.

Изд. № 9.

<http://www.gstu.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48