



В.А. Трефилов

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пермский государственный технический университет»

В.А. Трефилов

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Издательство
Пермского государственного технического университета
2007

УДК 621.315
Т66

Рецензенты:
канд. техн. наук, доцент *А.Н. Лыков*

Трефилов, В.А.

Т66 Основы электропривода учеб. пособие / В.А. Трефилов. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2007. – 158 с.
ISBN 978-5-88151-769-4

Кратко изложены основы общей теории электропривода постоянного и переменного тока, вопросы реализации разомкнутых и замкнутых систем электропривода и элементы его проектирования. Рассмотрены схемы, характеристики, режимы работы, регулировочные свойства, особенности пуска и торможения электроприводов.

Предназначено для студентов очного, заочного и дистанционного обучения специальности 140601 «Электромеханика», а также для студентов смежных специальностей, изучающих основы электропривода.

УДК 621.315

Издано в рамках приоритетного национального проекта «Образование» по программе Пермского государственного технического университета «Создание инновационной системы формирования профессиональных компетенций кадров и центра инновационного развития региона на базе многопрофильного технического университета»

ISBN 978-5-88151-769-4

© ГОУ ВПО «Пермский государственный
технический университет», 2007

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Понятие «электропривод»

Совокупность устройств, с помощью которых исполнительный орган рабочей машины приводится в движение, называется *приводом*.

Рабочий орган приводится в движение под действием механической энергии, которая получается за счет преобразования других видов энергии. В зависимости от вида преобразуемой энергии различают: гидравлический, пневматический, тепловой и электрический привод.

Наибольшее применение в промышленности нашел *электропривод* (ЭП), который потребляет около 60 % всей вырабатываемой электроэнергии. Повсеместное применение ЭП объясняется возможностью передачи электрической энергии на любые расстояния, легкостью ее трансформации и превращения в другие виды энергии.

Преимущества ЭП: более экономичное преобразование электроэнергии, большой диапазон мощностей и скоростей движения исполнительных органов, простота автоматизации процессов, высокий КПД, экологичность, использование в самых разнообразных условиях.

Электропривод – это управляемая электромеханическая система. Назначение системы – преобразовывать электроэнергию в механическую энергию и обратно и управлять процессом преобразования.

Электропривод имеет два канала: *силовой и информационный* (рис. 1.1). По силовому каналу транспортируется преобразуемая энергия, а по информационному каналу осуществляется управление потоком энергии и также сбор сведений о состоянии и функционировании системы.

Силовой канал состоит из двух частей: *электрической и механической*. В состав электрической части входят: система энергоснабжения (СЭС), силовой преобразователь (СП), электромеханический преобразователь (ЭМП). В состав механической части входят: вал ЭМП, механическая передача (МП), ра-

бочий орган машины (РО). Информационный канал связан с автоматизированной системой управления (АСУ) через информационный преобразователь (ИП).

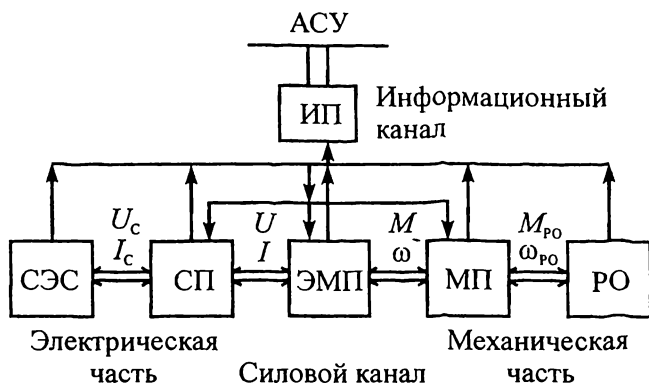


Рис. 1.1. Структурная схема электропривода

Электрическая энергия с параметрами U_c, I_c потребляется из системы энергоснабжения и подается на электропривод.

Силовой преобразователь осуществляет преобразование электрической энергии в энергию с параметрами U, I (параметры двигателя). В качестве силовых преобразователей применяются трансформаторы, управляемые выпрямители, инверторы тока и напряжения, регуляторы напряжения, преобразователи частоты, импульсные регуляторы напряжения. Силовой преобразователь – необязательный элемент электропривода.

В электромеханическом преобразователе происходит преобразование электрической энергии с параметрами U, I в механическую энергию с параметрами ω, M . Эти четыре параметра называются координатами электропривода. В качестве электромеханического преобразователя применяются двигатели постоянного тока с независимым, последовательным или смешанным возбуждением, асинхронные и синхронные двигатели, шаговые, вентильные и линейные двигатели.

Механическая энергия через механическую передачу передается на рабочий орган с параметрами ω_{po}, M_{po} . К передаточ-

ным устройствам относятся цилиндрические, червячные и планетарные редукторы, передачи винт–гайка, цепные и ременные передачи, гидромуфты и электромагнитные муфты. Механическая передача служит для согласования параметров рабочего органа с параметрами электромеханического преобразователя. Механическая передача – необязательный элемент электропривода.

1.2. Классификация электроприводов

Электроприводы классифицируются по видам источников электроэнергии; характеру движения; количеству используемых двигателей и их типам; видам и реализации силовых преобразователей; способам управления координатами электропривода; наличием или отсутствием механической передачи.

По виду потребляемой от источников электроэнергии различаются электроприводы постоянного и переменного тока.

В зависимости от характера движения электроприводы могут быть вращательного, поступательного и возвратно-поступательного движения, при этом скорость привода может быть регулируемой или нерегулируемой величиной, а само движение – непрерывным или дискретным, однонаправленным, двунаправленным (реверсивным) или возвратно-поступательным.

По количеству используемых двигателей различаются групповой, индивидуальный и взаимосвязанный электропривод. Групповой электропривод характеризуется тем, что один двигатель приводит во вращение несколько рабочих органов машины. Индивидуальный электропривод обеспечивает движение одного рабочего органа. Взаимосвязанный электропривод осуществляется двумя и более двигателями, электрически или механически связанными между собой и работающими на один или несколько рабочих органов.

Современные силовые преобразователи, применяемые в настоящее время в электроприводе, строятся главным образом на основе полупроводниковой техники с использованием силовых диодов, транзисторов и тиристоров. Их можно разделить на 4 вида:

– управляемые и неуправляемые выпрямители, которые преобразуют переменное напряжение в постоянное;

- инверторы, осуществляющие обратное преобразование напряжения;
- преобразователи частоты и напряжения переменного тока, изменяющие параметры напряжения переменного тока;
- импульсные преобразователи напряжения постоянного тока с различным видом модуляции выходного напряжения.

По структуре и способам управления координатами различаются неавтоматизированные и автоматизированные электроприводы с разомкнутыми и замкнутыми системами регулирования. Тенденция развития электропривода в настоящее время – повсеместное внедрение регулируемых автоматизированных приводов.

1.3. Энергетические диаграммы режимов работы электроприводов

Энергетически электропривод можно представить в виде электромеханической системы (ЭМС) и механического преобразователя (МП).

ЭМС включает в себя силовой преобразователь и электродвигатель. Преобразователь служит для преобразования электрической энергии электрической системы в электрическую энергию с параметрами, необходимыми для питания электродвигателя. Электрический двигатель является электромеханическим преобразователем, в котором электрическая энергия преобразуется в регулируемую механическую энергию. Выходными параметрами электромеханического преобразователя являются скорость и момент.

МП служит для преобразования механической энергии электродвигателя в механическую энергию рабочего органа или обратного преобразования.

Любая электрическая машина может работать в двух режимах: в двигательном или в тормозном (генераторном) режиме.

В двигательном режиме электрическая энергия потребляется из сети, небольшая часть ее расходуется на потери в силовом преобразователе и двигателе, а основная преобразуется в механическую энергию и подается на рабочий орган (рис. 1.2).

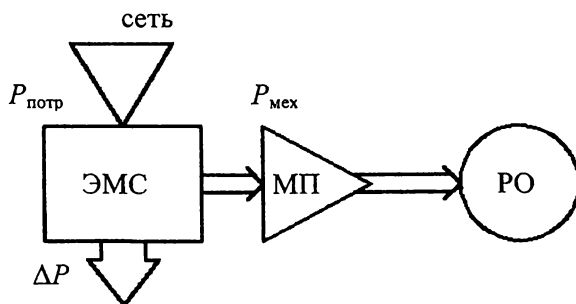


Рис. 1.2. Энергетическая диаграмма электропривода в двигательном режиме

В тормозном (генераторном) режиме подводимая механическая энергия преобразуется в электрическую энергию. Тормозные режимы отличаются по своим энергетическим характеристикам. Существуют следующие тормозные режимы:

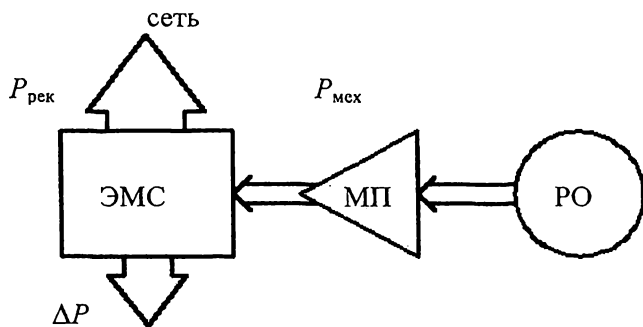
- рекуперативное генераторное торможение с отдачей энергии в сеть;
- динамическое торможение;
- торможение противовключением.

При рекуперативном торможении (рис. 1.3, а) энергия, запасенная в движущихся электромеханических системах, или потенциальная энергия груза при его спуске поступает на вал двигателя и преобразуется им как генератором в электрическую энергию. За вычетом потерь в ЭМС эта энергия поступает в сеть. Такой режим энергетически является наиболее выгодным, так как энергия торможения используется полезно.

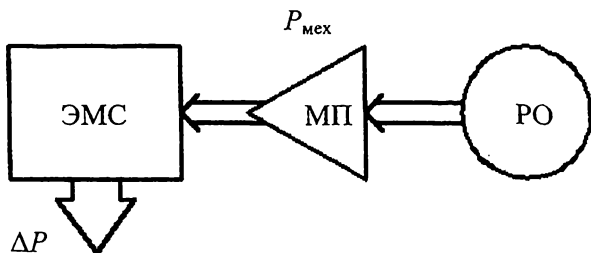
При динамическом торможении (рис. 1.3, б) двигатель отключается от сети и работает как автономный генератор, нагруженный на гасящее сопротивление. Механическая энергия (кинетическая энергия движения) поступает на вал двигателя, преобразуется в электрическую энергию и вся расходуется на потери в электрической цепи двигателя и во включенных в цепи обмоток двигателя сопротивлениях.

Торможение противовключением используется в двух случаях:

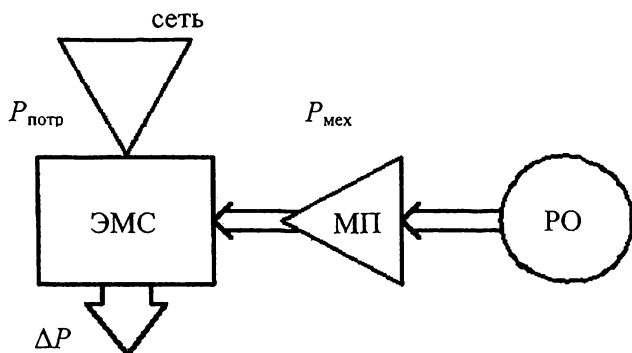
- 1) торможение противовключением, при котором двигатель вращается в одном направлении, а затем, с целью торможения,



a



б



в

Рис. 1.3. Энергетическая диаграмма электропривода:
a – при рекуперативном торможении; *б* – при динамическом торможении; *в* – при торможении противовключением

включается для вращения в другом направлении. Двигатель потребляет при этом электрическую энергию из сети и механическую энергию со стороны рабочего органа (кинетическую энергию движения). Суммарная энергия тратится на потери в электродвигателе и во включенных в цепи обмоток двигателя сопротивлениях. Режим сопровождается большими потерями энергии (рис. 1.3, в);

2) торможение противовключением при протягивающем грузе. Используется в грузоподъемных механизмах при спуске груза. Рабочий орган под действием тяжести груза движется в направлении опускания груза, а двигатель включается в сеть в направлении подъема груза, создавая необходимый тормозной момент. Энергетически этот режим аналогичен первому случаю.



Рис. 1.4. Режимы работы электропривода в поле координат ω — M

Все режимы работы электропривода можно показать на поле координат ω , M . Оси координат разделяют поле на четыре квадранта (рис. 1.4). I квадрант соответствует работе в двигательном режиме, II – работе в тормозных режимах, III – работе двигателя в противоположном направлении вращения, IV – работе в режиме протягивающего груза и в тормозных режимах с противоположным направлением вращения.

1.4. Регулирование координат электропривода

1.4.1. Регулирование скорости

Основная функция электропривода состоит в управлении его координатами: скоростью, моментом (током) и положением. Чаще всего регулируемой координатой является скорость, при этом регулирование скорости заключается в получении искусственных характеристик.

Скорости рабочего органа и двигателя при вращательном движении связаны между собой выражением $\omega_{po} = \frac{\omega}{i}$, где i – передаточное отношение редуктора. Следовательно, регулирование скорости рабочего органа может быть достигнуто за счет воздействия на двигатель или на механическую передачу, или одновременно на двигатель и передачу.

Механический способ регулирования связан с изменением передаточного отношения i . Этот способ применяется ограничено из-за сложности автоматизации технологического процесса, малого набора регулируемых передач, невысокой надежности и экономичности.

Электрический способ предусматривает воздействие на двигатель при постоянных параметрах передачи. Этот способ обладает широкими регулировочными возможностями, экономичностью, простотой и находит наибольшее применение в электроприводе.

Комбинированный способ находит ограниченное применение в электроприводе металлообрабатывающих станков.

Рассмотрим применение электрического способа. На рис. 1.5 представлены естественная и искусственные механические характеристики двигателя постоянного тока. Обе искусственные характеристики (2 и 3) обеспечивают при статическом моменте M_c получение одной и той же скорости ω_{min} .

Регулирование скорости оценивается следующими показателями:

1. *Диапазон регулирования*, определяется как отношение максимальной скорости к минимальной при данном способе регулирования

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}. \quad (1.1)$$

2. *Стабильность скорости*, которая характеризует изменение скорости при возможных колебаниях момента нагрузки на валу. Этот показатель связан с жесткостью характеристики. Чем больше жесткость, тем стабильнее скорость. Стабильность скорости на характеристиках 1 и 3 одинакова и больше, чем на характеристике 2.

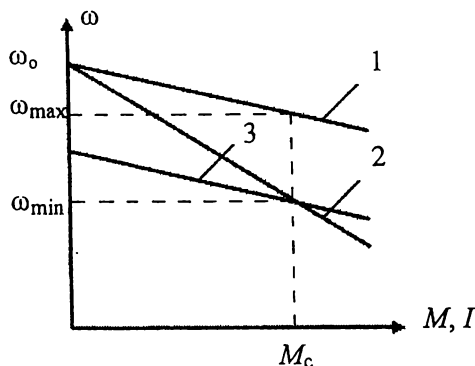


Рис. 1.5. К определению диапазона регулирования скорости

3. *Плавность регулирования*. Этот показатель определяется изменением скорости при переходе с одной искусственной характеристики на другую. Чем больше можно получить искусственных характеристик в заданном диапазоне изменения скорости, тем плавней происходит регулирование скорости.

4. *Направление регулирования скорости*. При регулировании скорости она может повышаться или понижаться по сравнению с работой на естественной характеристике при заданном моменте нагрузки. Если скорость изменяется в одну сторону, то говорят об однозонном регулировании; если скорость меняется в обе стороны, то говорят о двухзонном регулировании. Регулирование вверх связано с получением искусственных характеристик, располагаемых выше естественной, а регулирование вниз — с получением характеристик ниже естественной.

5. *Допустимая нагрузка двигателя.* Двигатель рассчитан для работы с номинальными параметрами, в этом случае он имеет нормативный нагрев и нормативный срок службы, который составляет примерно 15–20 лет. При регулировании скорости двигатель работает на искусственных характеристиках при отличных от паспортных данных условиях. Для сохранения нормативного нагрева его нагрузка должна быть такой, чтобы ток двигателя не был выше номинального. Такая нагрузка называется допустимой. Регулирование по допустимым нагрузкам осуществляется при постоянной мощности или при постоянном моменте.

6. *Экономичность регулирования.* Одни и те же параметры при регулировании скорости могут быть обеспечены различными способами регулирования. При сопоставлении способов регулирования между собой проводится оценка их технико-экономических показателей. Обычно варианты сравниваются по капитальным затратам и эксплуатационным расходам. Эффективность затрат оценивается по сроку их окупаемости с учетом нормативного срока окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = C_{\text{об}} / Ц_{\text{год.эф}}$$

где $C_{\text{об}}$ – стоимость оборудования; $Ц_{\text{год.эф}}$ – цена годового эффекта от использования оборудования. Если капитальные затраты окупаются не более чем за 6–7 лет, то такое решение является экономически обоснованным.

1.4.2. Регулирование положения

В ряде технологических процессов требуется перемещение исполнительных органов в заданную точку пространства и его остановку с заданной точностью. Это относится, в первую очередь, к роботам и манипуляторам. Такое перемещение исполнительного органа называется *позиционированием*. Оно достигается соответствующим регулированием положения вала двигателя. Если не требуется высоких точности и качества движения, то позиционирование осуществляется с помощью путевых или конечных выключений. Они устанавливаются в заданных позициях, и при подходе к ним исполнительного органа срабатывают

и отключают двигатель. Для обеспечения высокой точности позиционирования формируется оптимальный график движения привода. Такой типовой график состоит из трех участков: разгона, движения с установившейся скоростью и торможения (рис. 1.6).

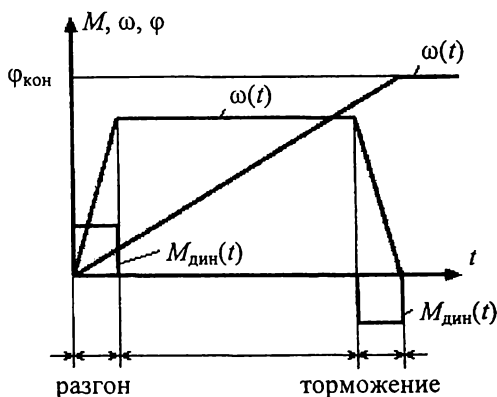


Рис. 1.6. Оптимальный график движения электропривода при регулировании положения

График движения предусматривает формирование графиков момента двигателя и его скорости. Точное позиционирование, как правило, обеспечивается в замкнутой системе электропривода по системе преобразователь—двигатель.

1.4.3. Регулирование момента и тока

В некоторых механических процессах, например прокатка металла, изготовление провода и др., требуется, чтобы исполнительные органы создавали необходимое натяжение материала. Это достигается за счет регулирования момента на рабочих органах соответствующих машин. Во многих случаях требуется ограничивать момент для предотвращения поломки механизма, например бурение скважин, заклинивание передач и т.д. Развиваемый момент двигателя можно записать в виде $M = k \Phi I$. Таким образом, за счет регулирования магнитного потока и тока можно ограничивать момент.

Ограничение момента и тока представляет самостоятельную задачу при рассмотрении процесса пуска двигателей. Так, пусковой ток двигателя постоянного тока не должен быть больше $(2-3)I_H$. При пуске мощных двигателей переменного тока его также ограничивают, чтобы не снижать величину питающего напряжения. При анализе процесса регулирования тока удобно пользоваться электромеханическими характеристиками $\omega = f(I)$, а при регулировании момента – механическими характеристиками $\omega = f(M)$.

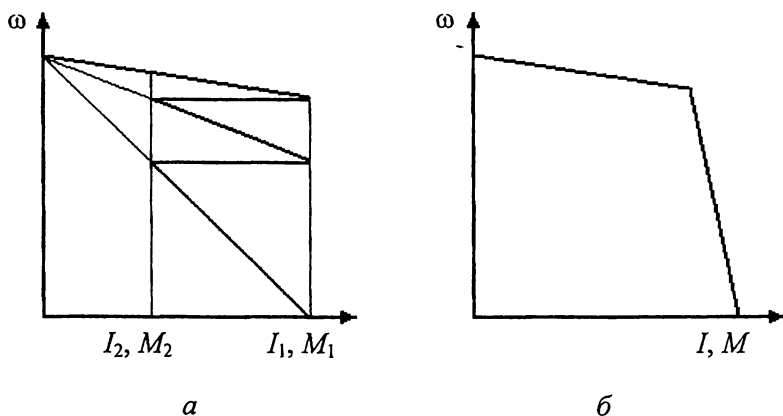


Рис. 1.7. Пусковые диаграммы двигателя в разомкнутом ЭП (а) и в замкнутом ЭП (б)

На рис. 1.7 показаны пусковые диаграммы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, поясняющие ограничение тока и момента при пуске в разомкнутом и замкнутом электроприводе. Из представленных диаграмм следует, что при пуске двигателя осуществляется регулирование тока в пределах $I_1 - I_2$, момента в пределах $M_1 - M_2$. Регулирование координат осуществляется с невысокой точностью. Для повышения точности нужно сузить диапазон изменения координат, т.е. увеличить число ступеней. Этот способ применяется в разомкнутых электроприводах и называется *параметрическим*. Он отличается простотой реализации, но невысокой точностью. В замкнутых системах можно получить высокую точность регулирования (ограничения) момента и тока.

1.5. Структура электроприводов при регулировании координат

В зависимости от выполняемых функций, вида и количества регулируемых координат все электроприводы делятся на две группы:

- неавтоматизированные;
- автоматизированные.

В неавтоматизированном электроприводе им управляет оператор с помощью простых средств управления. Для помощи оператору электропривод снабжен элементами защиты, блокировки и сигнализации.

В автоматизированном электроприводе управление осуществляется схемой управления. Человек выполняет только функции включения и отключения электропривода в конце работы, а также контроль и наладку системы управления. Автоматизированный электропривод может быть двух видов: разомкнутым или замкнутым (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Классификация электроприводов по их структуре

Разомкнутый электропривод – это электропривод, в котором осуществляется параметрическое регулирование координат. Разомкнутый электропривод не отстроен от влияния возмущения, которые отражаются на его работе. Электропривод прост в схемном отношении, но не обеспечивает требуемого качества

регулирования. Обычно такой электропривод применяется для осуществления пуска, торможения или реверса двигателя.

Замкнутый электропривод – это электропривод с обратными связями. В замкнутом электроприводе регулирование координат осуществляется по трем принципам.

Для реализации *принципа регулирования по возмущению* (рис. 1.9) используется дополнительный сигнал, пропорциональный возмущению, который подается на вход электропривода вместе с сигналом задания. Суммарный сигнал обеспечивает такое управление приводом, при котором осуществляется компенсация внешнего возмущения, т.е. устраняется его влияние на регулируемую величину. Этот принцип не нашел широкого применения из-за практической сложности реализации датчиков возмущения, в частности датчиков момента нагрузки.

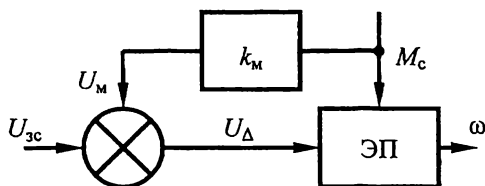


Рис. 1.9. Принцип регулирования по возмущению

В электроприводе с *регулированием по отклонению* (рис. 1.10) применяется обратная связь, по которой информация о регулируемой величине подается на вход электропривода

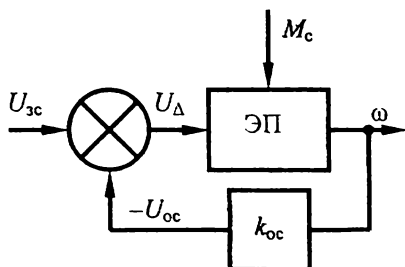


Рис. 1.10. Принцип регулирования по отклонению

в виде сигнала обратной связи. Этот сигнал сравнивается с задающим сигналом и результирующий сигнал (сигнал рассогласования) является управляющим сигналом для электропривода. При этом происходит соответствующее изменение работы привода, т.е. полное или частичное восстановление регулируемой величины. Данные системы электропривода являются основными в настоящее время.

Комбинированный способ регулирования – это объединение обоих принципов регулирования. Имеет ограниченное применение в металлообрабатывающей промышленности.

Глава 2 МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Основные законы механики электропривода

Назначение электропривода состоит в том, чтобы обеспечить движение рабочей машины и управлять этим движением. Параметрами движения применительно к приводам вращательного действия являются:

φ – угол поворота, рад;

ω – угловая скорость или частота вращения, рад/с;

ε – угловое ускорение, рад/с²;

M – момент, Н·м;

J – момент инерции, кг·м²

Движение механических звеньев электропривода подчиняется законам Ньютона.

1-й закон Ньютона – закон инерции. Для вращательного движения закон формулируется следующим образом: тело, имеющее ось вращения, находится в состоянии покоя или равномерного движения до тех пор, пока приложенные к нему моменты не выведут его из этого состояния:

$$J \frac{d\omega}{dt} = 0, \text{ если } M_{\Sigma} = 0. \quad (2.1)$$

В силовом механическом канале электропривода действуют следующие моменты:

M – электромагнитный момент двигателя, действующий на ротор (или якорь) машины. Может быть положительным, если двигатель работает в двигательном режиме, при котором идет преобразование электрической энергии в механическую энергию, и отрицательным, если двигатель работает в тормозных режимах, при которых идет преобразование механической энергии в электрическую;

$M_{с.а}$ – момент сопротивления активный, который прилагается к исполнительным органам рабочей машины. Создается, например, силами тяжести в электроприводе грузоподъемных механизмов; силами ветра в электроприводе башенных кранов и т.д. Может быть положительным, если направление момента совпадает с направлением скорости вращения, и отрицательным, если направления момента и скорости противоположны;

$M_{с.р}$ – момент сопротивления реактивный, который прилагается к исполнительным органам рабочей машины. Возникает как реакция на движение рабочего органа и всегда препятствует движению, при $\omega = 0$ $M_{с.р} = 0$;

$M_{тр}$ – момент от сил трения, который может возникать в подшипниках или других элементах кинематической цепи. Момент препятствует движению, имеется в отличие от $M_{с.р}$ при $\omega = 0$.

Знаки всех моментов определяются в отношении знака ω . Если момент способствует движению, то он положительный, если препятствует – отрицательный. Результирующий момент M определяется алгебраической суммой всех моментов.

2-й закон Ньютона – закон динамики. Формулировка закона для вращательного движения: импульс момента равен изменению количества движения:

$$M_{\Sigma} dt = d(J\omega). \quad (2.2)$$

Количество движения – это произведение момента инерции J тела на угловую скорость ω . Момент инерции J – это параметр, аналогичный по смыслу массе, характеризует меру инерции вращающегося тела. Значения J приводятся в справочниках

и каталогах. Иногда вместо момента инерции J приводится значение махового момента GD^2 , тогда $J = GD^2/4$. Таким образом, механическая инерционность тела зависит не только от массы G , но и от диаметра D . Поэтому часто в электроприводах с ударной нагрузкой применяются маховики.

В большинстве случаев J остается постоянным, поэтому второй закон Ньютона записывается в виде: $M_{\Sigma} dt = J d\omega$.

3-й закон Ньютона – закон равенства действия и противодействия. Для вращательного движения этот закон формулируется так: моменты, с которым два тела взаимодействуют друг с другом, равны по величине и противоположны по направлению. Закон объясняет наличие реакции опоры, поэтому корпуса двигателей крепят к фундаменту или станине. Если этого не сделать, то при нагрузке вращаться будет не ротор, а статор электрической машины.

2.2. Уравнение движения электропривода

Обозначим сумму моментов сопротивления движению как M_c и назовем ее статическим моментом на валу двигателя.

Запишем второй закон Ньютона:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.3)$$

где M – электромагнитный момент двигателя; M_c – статический момент сопротивления; а J – суммарный момент инерции привода, $J = J_d + J_{PO}$.

В этом уравнении все моменты приложены к валу двигателя, а момент инерции J отражает инерционность всех масс, движущихся вместе с валом. Если исполнительный орган рабочей машины непосредственно связан с валом двигателя, то можно пользоваться этой формулой. Данное уравнение описывает модель жесткого механического звена, представленного на рис. 2.1.

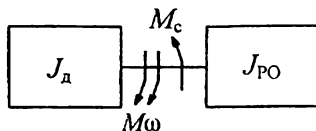


Рис. 2.1. Модель жесткого механического звена

2.3. Приведение моментов инерции и моментов сопротивления

Очень часто рабочий орган машины связан с валом двигателя через передаточное устройство. Реальное механическое звено в этом случае может быть представлено моделью, показанной на рис. 2.2. Пользоваться представленным выше уравнением движения в этом случае нельзя, так как моменты M и M_c приложены к различным валам, а инерционные массы вращаются с разными скоростями.

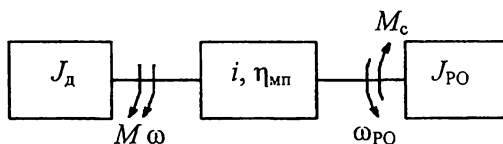


Рис. 2.2. Модель реального механического звена

Для того чтобы воспользоваться уравнением движения, отдельные кинематические звенья силового механического канала приводят к одному валу, обычно к валу двигателя.

При приведении момента инерции рабочего органа J_{PO} к валу двигателя исходят из равенства кинетических энергий:

$$\frac{J_{PO} \omega_{PO}^2}{2} = \frac{J_{PO \text{ пр}} \omega^2}{2}.$$

Откуда получаем

$$J_{PO \text{ пр}} = J_{PO} \left(\frac{\omega_{PO}}{\omega} \right)^2 = \frac{J_{PO}}{i^2}, \quad (2.4)$$

где i — передаточное число редуктора, $i = \frac{\omega}{\omega_{PO}}$.

После приведения момент инерции привода определяется как $J = J_d + J_{PO \text{ пр}}$.

При приведении момента сопротивления к валу двигателя исходят из принципа сохранения механических мощностей:

$$M_{ср0}\omega_{р0} = M_c\omega.$$

Если учитывается коэффициент полезного действия передаточного устройства $\eta_{мп}$, то статический момент

$$M_c = \frac{M_{ср0}}{\eta_{мп} i}. \quad (2.5)$$

В некоторых кинематических схемах присутствуют звенья с поступательным движением. При приведении в этом случае не будем учитывать моменты инерции передаточного устройства и барабана.

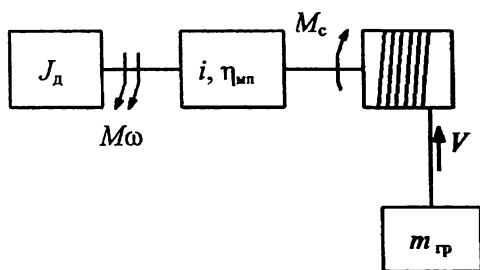


Рис. 2.3. Модель приведенного механического звена с лебедкой

Момент инерции массы груза $m_{гр}$, движущейся со скоростью v , находится из равенства кинетических энергий

$$\frac{m_{гр} v^2}{2} = \frac{J_{гр} \omega_6^2}{2},$$

где линейная скорость $v = R_6 \omega_6$, ω_6 – угловая скорость барабана.

Приведенный момент инерции массы груза

$$J_{гр} = \frac{m_{гр} \omega_6^2 R_6^2}{\omega^2} = \frac{m_{гр} R_6^2}{i^2} = m_{гр} \rho^2, \quad (2.6)$$

где ρ – радиус приведения, $\rho = \frac{R_6}{i}$.

В подъемных механизмах статический момент, создаваемый грузом, является активным, поэтому в случае подъема груза момент двигателя будет полностью преодолевать статический момент. Момент прикладывается к валу барабана и определяется как

$$M_{с.б} = m_{гр} g R_б.$$

Приведенный к валу двигателя статический момент с учетом КПД передачи

$$M_c = \frac{M_{с.б}}{\eta_{мп} i} = \frac{m_{гр} g R_б}{\eta_{мп} i} = \frac{m_{гр} g \rho}{\eta_{мп}}. \quad (2.7)$$

В случае опускания груз частично будет опускаться под действием собственного веса, поэтому момент двигателя несколько уменьшается. В этом случае статический момент сопротивления определяем как

$$M_c = \frac{M_{с.б} \eta_{мп}}{i} = m_{гр} g \rho \eta_{мп}. \quad (2.8)$$

После приведения момента инерции и момента сопротивления получаем схему жесткого механического звена (см. рис. 2.1), для которого уравнение движения имеет вид (2.3).

2.4. Установившееся движение привода и его устойчивость

Установившееся механическое движение привода соответствует равенству момента двигателя и исполнительного органа: $M = M_c$. Проверка этого условия обычно производится с помощью механических характеристик двигателя и исполнительного органа.

Механической характеристикой двигателя называется зависимость его скорости от момента $\omega = f(M)$.

Механические характеристики двигателей могут быть естественными (рис. 2.4) и искусственными. Естественная характеристика соответствует основной схеме включения и номинальным параметрам питающегося напряжения. Она соответствует

не номинальным параметрам напряжения. Когда двигатель включается не по основной схеме и в его цепях включены дополнительные элементы, характеристика двигателя искусственная. Искусственные характеристики получают при регулировании токов, моментов и скорости двигателя.

Коэффициент жесткости характеристики (рис. 2.5)

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \approx \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (2.9)$$

Синхронный двигатель имеет бесконечно большую жесткость. Асинхронный двигатель и машины постоянного тока последовательного возбуждения – переменную жесткость. Машины постоянного тока параллельного возбуждения – постоянную жесткость.

Механическая характеристика рабочего органа – это зависимость его частоты вращения от момента $\omega_{PO} = f(M_{PO})$. В результате приведения моментов получают зависимость частоты вращения механизма от момента $\omega = f(M_c)$. Стандартные механические характеристики некоторых механизмов приведены на рис. 2.6.

Введенное понятие жесткости позволяет выполнить проверку условия установив-

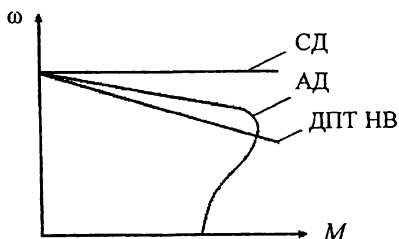


Рис. 2.4. Естественные механические характеристики двигателей

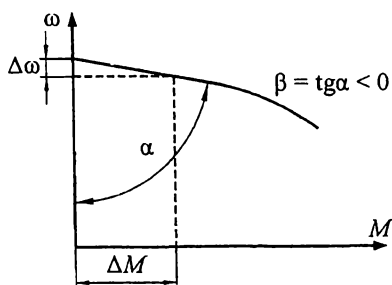


Рис. 2.5. К определению жесткости механической характеристики

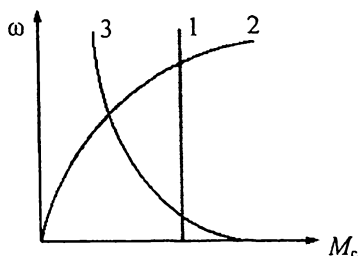


Рис. 2.6. Механические характеристики некоторых механизмов: 1 – $M_c = \text{const}$; 2 – $M_c \sim \omega^2$; 3 – $M_c \sim 1/\omega$

шегося режима, для этого совмещают в одном квадранте характеристики двигателя и механизма, и точка пересечения характеристик будет соответствовать установившемуся режиму.

В зависимости от вида механических характеристик установившееся движение может быть устойчивым или неустойчивым.

Под *устойчивостью* понимается свойство системы двигатель – рабочий орган поддерживать движение со скоростью $\omega_{уст}$ при возможных отклонениях от этой скорости.

Вопрос об устойчивости рассмотрим по характеристикам, представленным на рис. 2.7. Предположим, что скорость системы увеличилась до значения ω_1 . В точке A_1 момент двигателя M_1 меньше $M_{уст}$ и в соответствии с уравнением движения $M_1 - M_{уст} = J \frac{d\omega}{dt}$ динамический момент будет отрицательным, т.е. $\Delta M < 0$. Следовательно, система начнет тормозиться, и этот процесс закончится в точке А.

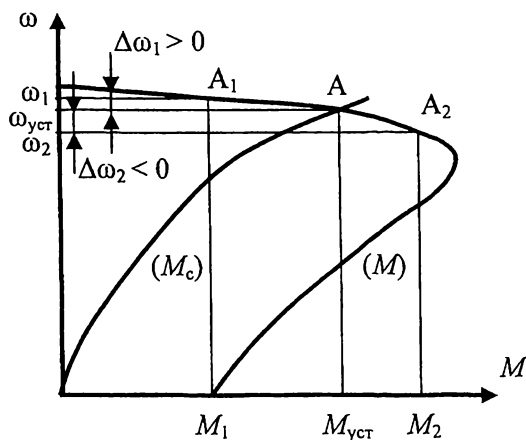


Рис. 2.7. К определению параметров установившегося режима

Если скорость уменьшить до значения ω_2 , динамический момент в системе будет положительным. Начинается процесс

разгона, который заканчивается в точке А. В данном случае движение является устойчивым.

Проверка устойчивости может быть выполнена с использованием понятия жесткости. Движение устойчивое при условии

$$\beta - \beta_c < 0 \text{ или } \beta < \beta_c. \quad (2.10)$$

2.5. Переходный механический режим электропривода при постоянном динамическом моменте

Движение привода считается неустановившимся тогда, когда $M \neq M_c$, т.е. в системе имеется динамический момент. В зависимости от знака динамического момента может происходить увеличение или уменьшение скорости двигателя. Типичными видами неустановившегося движения являются: пуск, торможение, реверс, переход с одной характеристики на другую при регулировании скорости и т.д. Неустановившееся движение называется переходным процессом электропривода.

В переходных процессах важно знать зависимости механических координат привода: скорости, момента и угла положения от времени. Указанные зависимости получают в результате решения уравнения механического движения привода

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.11)$$

В общем случае моменты двигателя и рабочего органа являются функциями времени, скорости и угла положения. Рассмотрим случаи, когда моменты, в том числе и динамический, зависят от скорости. Возможны три случая:

- переходный процесс при постоянном динамическом моменте;
- процесс при динамическом моменте, линейно зависящем от скорости;
- переходный процесс при произвольном динамическом моменте.

Рассмотрим процесс при постоянном динамическом моменте. Пусть известны характеристики двигателя 1 и исполнительного органа 2 (рис. 2.8).

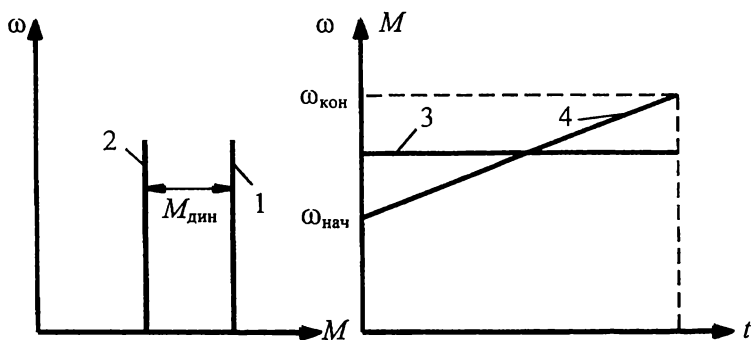


Рис. 2.8. Механические характеристики и графики переходного процесса при $M = \text{const}$ и $M_c = \text{const}$

Уравнение (2.11) решается путем разделения переменных:

$$\omega = \frac{M_{\text{дин}}}{J} t + C,$$

где $M_{\text{дин}}$ – динамический момент, $M_{\text{дин}} = M - M_c$, а постоянная интегрирования $C = \omega_{\text{нач}}$ находится из начальных условий: при $t = 0$, $\omega = \omega_{\text{нач}}$.

Окончательное решение уравнения движения имеет вид

$$\omega = \frac{M_{\text{дин}}}{J} t + \omega_{\text{нач}}. \quad (2.12)$$

Время переходного процесса при изменении скорости от начального значения $\omega_{\text{нач}}$ до какого-то конечного значения $\omega_{\text{кон}}$

$$t_{\text{п.п}} = J \frac{\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}}{M_{\text{дин}}} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta M}. \quad (2.13)$$

2.6. Переходный механический процесс электропривода при динамическом моменте, линейно зависящем от скорости

Рассмотрим процесс при линейно изменяющемся динамическом моменте. Такой момент возникает в том случае, когда моменты двигателя и исполнительного органа линейно зависят

от скорости. Это характерно для привода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения и для асинхронного двигателя с фазным ротором (рис. 2.9).

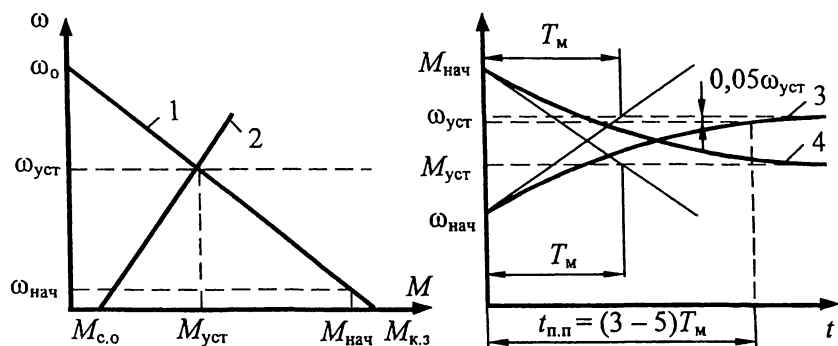


Рис. 2.9. Механические характеристики и графики переходного процесса при линейных зависимостях $\omega(M)$ двигателя и механизма

Запишем уравнение механических характеристик двигателя постоянного тока и механизма в виде

$$M = M_{к.з} - \beta\omega, \quad (2.14)$$

$$M_c = M_{с.о} + \beta_c\omega, \quad (2.15)$$

где β и β_c – коэффициенты жесткости характеристик.

Подставим эти выражения в уравнение движения.

После введения обозначений

$$\omega_{уст} = \frac{M_{к.з} - M_{с.о}}{\beta + \beta_c} \quad \text{и} \quad T_m = \frac{J}{\beta + \beta_c}$$

получим неоднородное дифференциальное уравнение с постоянной правой частью

$$T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст}, \quad (2.16)$$

где T_m – электромеханическая постоянная системы, с.

Решение неоднородного уравнения имеет вид

$$\omega(t) = A e^{-\frac{t}{T_M}} + \omega_{уст}. \quad (2.17)$$

Постоянную $A = \omega_{нач} - \omega_{уст}$ определяем из начальных условий: $t = 0, \omega = \omega_{нач}$.

Тогда окончательно имеем

$$\omega(t) = (\omega_{нач} - \omega_{уст}) e^{-\frac{t}{T_M}} + \omega_{уст}. \quad (2.18)$$

Подставив выражение (2.18) в уравнение (2.14) механической характеристики двигателя с учетом

$$\beta = \frac{M_{к.з} - M_{уст}}{\omega_{уст}} = \frac{M_{к.з} - M_{нач}}{\omega_{нач}},$$

найдем зависимость момента от времени:

$$M(t) = (M_{нач} - M_{уст}) e^{-\frac{t}{T_M}} + M_{уст}. \quad (2.19)$$

Графики переходного процесса при динамическом моменте, линейно зависящем от скорости, представлены на рис. 2.9.

В практике электроприводов распространен случай, когда $\beta_c = 0$, т.е. когда статический момент $M_c = \text{const}$. Тогда величины T_m и $\omega_{уст}$ определяем по выражениям

$$T_m = \frac{J}{\beta} = \frac{J \omega_o}{M_{к.з}}, \quad \omega_{уст} = \frac{M_{к.з} - M_c}{\beta}. \quad (2.20)$$

Время переходного процесса получаем путем логарифмирования выражений $\omega(t)$ или $M(t)$ при условии: $t = t_{п.п}, \omega(t) = \omega_{кон}, M(t) = M_{кон}$. Опуская промежуточные действия, получим

$$t_{п.п} = T_m \cdot \ln \left| \frac{\omega_{уст} - \omega_{нач}}{\omega_{уст} - \omega_{кон}} \right| = T_m \cdot \ln \left| \frac{M_{уст} - M_{нач}}{M_{уст} - M_{кон}} \right|. \quad (2.21)$$

Теоретически время переходного процесса $t_{п.п}$ до достижения установившегося значения скорости или момента равно

бесконечности. На практике за это время принимают расчетное время переходного процесса: $t_{п.п} = (3 - 5)T_m$.

Электромеханическая постоянная времени T_m имеет определенный геометрический и физический смысл. На графиках переходного процесса значение постоянной времени T_m равно отрезку времени, отсекаемому на горизонтальной прямой, соответствующей установившемуся уровню переменной, касательной к кривой переходного процесса, проведенной в точке $t = 0$. Количественно T_m определяет время разгона двигателя на холостом ходу под действием момента $M_{к.з}$ из неподвижного состояния до скорости ω_0 :

$$t_{п.п} = \frac{J\omega_0}{M_{к.з}} = T_m. \quad (2.21)$$

2.7. Переходный механический процесс электропривода при произвольном динамическом моменте

Переходные процессы этого вида относятся к случаям, когда моменты двигателя и рабочего органа являются функциями времени. Основные трудности получения зависимостей $\omega(t)$ и $M(t)$ связаны с интегрированием уравнения движения, которое не имеет единого универсального способа решения. В зависимости от исходных данных могут применяться различные методы нахождения кривых переходного процесса. Рассмотрим некоторые из этих методов:

1. *Линеаризация нелинейных механических характеристик двигателя и исполнительного органа.* Этот способ основан на аппроксимации механических характеристик или их отдельных участков прямыми линиями. Если переходный процесс определяется по участкам, то конечные значения переменных на предыдущем участке являются начальными значениями для следующего участка.

2. *Точное интегрирование уравнения движения.* Этот способ может применяться в том случае, когда моменты двигателя и рабочего органа заданы аналитически как функции скорости, времени или положения. В этом случае решение является точным.

3. *Метод численного интегрированного уравнения движения.* Этот метод применяется в случае, когда механические ха-

рактеристики заданы графически или в виде таблиц. Наиболее простым методом интегрирования уравнения движения является метод Эйлера.

Глава 3

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВИГАТЕЛЕМ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В электроприводе постоянного тока используются двигатели с независимым, последовательным и смешанным возбуждением. В электроприводе мощностью до 20 кВт применяются также двигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

Электропривод на базе двигателя постоянного тока является одним из основных видов регулируемого привода. Замкнутые электроприводы постоянного тока создаются на базе системы управляемый выпрямитель – двигатель. Этот привод отличается высоким качеством регулирования координат. В разомкнутом электроприводе характерным является параметрическое регулирование выходных координат.

Промышленность выпускает двигатели серии 2П, мощностью от 0,13 до 200 кВт. В последнее время разработана серия 4П напряжением 110–220 В со скоростью вращения 750–2000 об/мин. Двигатели серии 4П отличаются уменьшенным расходом меди на 25–30 % по сравнению с двигателями серии 2П.

Выпускаются также специализированные двигатели постоянного тока на большие мощности и высокие напряжения (для металлургии).

3.1. Электромеханические свойства ДПТ НВ

Схема включения двигателя с независимым возбуждением (ДПТ НВ) приведена на рис. 3.1. Уравнение якорной цепи двигателя

$$U = E + IR, \quad (3.1)$$

где R – полное сопротивление якорной цепи, $R = R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$; U – подводимое напряжение; E – ЭДС якоря; I – ток якоря.

ЭДС обмотки якоря и электромагнитный момент двигателя

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

где k – конструктивный коэффициент, $k = \frac{pN}{2\pi a}$, p – число пар полюсов, N – число активных проводников в обмотке якоря, a – число параллельных ветвей обмотки якоря; Φ – магнитный поток; ω – угловая скорость вращения якоря.

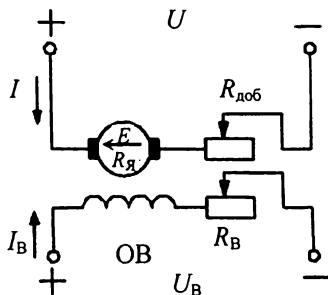


Рис. 3.1. Схема включения ДПТ НВ

Из этих уравнений можно получить уравнение электро-механической или скоростной характеристики: $\omega = f(I)$,

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - I \frac{R}{k\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (3.3)$$

где ω_0 – скорость идеального холостого хода, $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$; $\Delta\omega$ – перепад скорости, $\Delta\omega = I \frac{R}{k\Phi}$.

Уравнение механической характеристики $\omega = f(M)$ получается из уравнения (4.3), если ток выразить через момент – $I = \frac{M}{k\Phi}$,

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R}{(k\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (3.4)$$

где перепад скорости $\Delta\omega = M \frac{R}{(k\Phi)^2}$.

Введем в уравнение коэффициент жесткости характеристики $\beta = \frac{(k\Phi)^2}{R}$. Тогда уравнение электро-механической характеристики примет вид

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta} \quad (3.5)$$

Двигатели постоянного тока являются компенсированными машинами, т.е. в них, как правило, не сказывается реакция якоря, поэтому магнитный поток принято считать постоянным. Электромеханические и механические характеристики являются линейными характеристиками и могут представлять одну зависимость на графике.

Характеристики двигателя в поле координат $\omega - M$ приведены на рис. 3.2, где представлены:

1 – естественная скоростная или механическая характеристики при вращении двигателя в прямом направлении;

2 – характеристика двигателя при отсутствии питающего напряжения;

3 – характеристика двигателя при вращении в обратном направлении.

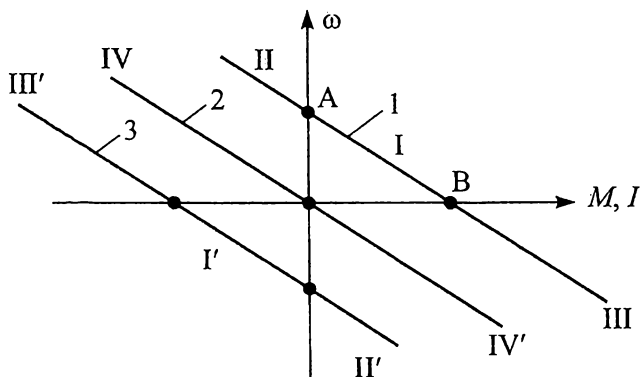


Рис. 3.2. Характеристики ДПТ НВ в поле координат $\omega - M$

Рассмотрим области режимов работы двигателя:

I – двигательный режим, в котором можно выделить *граничные режимы*:

т. А – режим идеального холостого хода с координатами $\omega_0; I = M = 0$;

т. В – режим короткого замыкания с координатами $\omega = 0$;

$$I_{к.з} = \frac{U}{R}, M_{к.з} = k \Phi I_{к.з};$$

II – генераторное торможение с рекуперацией энергии в сеть;

III – торможение противовключением (режим протягивающего груза).

Характеристики при $U = 0$ описывают режим динамического торможения двигателя. При динамическом торможении обмотка якоря отключается от сети и подключается на гасящее сопротивление или замыкается накоротко. В этом режиме двигатель работает как автономный генератор. Уравнения электромеханической и механической характеристик имеют вид

$$\omega = -I \frac{R}{k\Phi}, \quad \omega = -M \frac{R}{(k\Phi)^2} = -\frac{M}{\beta}. \quad (3.6)$$

3.2. Способы параметрического регулирования скорости ДПТ НВ

Из формул характеристик вытекают три способа регулирования скорости:

- реостатное регулирование путем введения сопротивления R_d в якорную цепь;
- регулирование изменением магнитного потока Φ ;
- якорное регулирование путем изменения подводимого напряжения U .

1. Реостатное регулирование. Величина вводимого в якорную цепь сопротивления R_d изменяет жесткость механической характеристики, а на величину ω_0 не влияет, поэтому характеристики выходят из одной точки ω_0 , имея разный наклон. Электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ при реостатном регулировании скорости показаны на рис. 3.3.

Показатели качества регулирования скорости:

- 1) диапазон регулирования небольшой и составляет величину порядка $D = 2 \dots 3$;

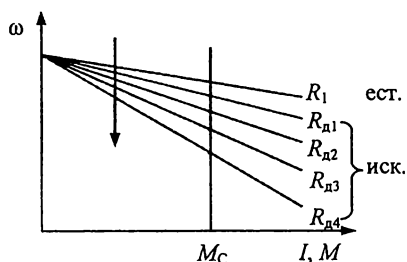


Рис. 3.3. Характеристики ДПТ НВ при реостатном регулировании

2) направление регулирования однозонное в сторону уменьшения скорости вращения;

3) плавность регулирования зависит от характера изменения добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря, чаще всего регулирование ступенчатое;

4) жесткость характеристик и стабильность скорости уменьшается при увеличении $R_{д}$;

5) экономичность способа регулирования оценивается по капитальным затратам и потерям мощности при регулировании. Капитальные затраты небольшие, так как стоимость добавочных резисторов невысока, а потери мощности значительны.

Оценим эти потери: потребляемая из сети электрическая мощность $P_1 = UI$; механическая мощность на валу двигателя $P_2 = M\omega$.

Потери мощности определим как разность этих мощностей:

$$\begin{aligned}\Delta P &= P_1 - P_2 = k\Phi\omega_o I - k\Phi\omega I = \\ &= k\Phi\omega_o I \left(1 - \frac{\omega}{\omega_o}\right) = P_1 \left(\frac{\omega_o - \omega}{\omega_o}\right) = P_1 \delta,\end{aligned}$$

где $\delta = \left(\frac{\omega_o - \omega}{\omega_o}\right) = \frac{\Delta\omega}{\omega_o}$ — относительный перепад скорости.

Следовательно, потери мощности двигателя пропорциональны относительному перепаду скорости. Предположим, что перепад скорости $\delta = 0,5$. Тогда диапазон регулирования $D \approx 2$, а КПД двигателя $\eta \leq 50\%$ (если $D \approx 3$, то η еще меньше). Таким образом, реостатное регулирование не экономично из-за больших потерь;

б) допустимая нагрузка определяется по предельно допустимому моменту, который может развить двигатель не перегреваясь, т.е. при номинальном токе. Так как магнитный поток дви-

гателя не меняется и равен номинальному потоку Φ_n , то допустимый момент $M_{\text{доп}} = k \Phi_n I_n = M_n$ при работе на любой характеристике.

Этот способ регулирования относится к регулированию при постоянном моменте. Однако это относится только к случаю, когда охлаждение двигателя не зависит от скорости вращения. Если охлаждение зависит от скорости вращения, то при уменьшении скорости необходимо снижать нагрузку двигателя.

2. Регулирование изменением магнитного потока Φ .
Данный способ регулирования находит широкое применение из-за простоты реализации и экономичности, так как осуществляется в маломощной цепи возбуждения. ДПТ проектируется таким образом, что его номинальный магнитный поток Φ_n находится на колене кривой намагничивания (рис. 3.4). Незначительное повышение магнитного потока можно получить при значительном увеличении тока возбуждения I_b , но это вызовет дополнительный нагрев двигателя, увеличение потерь в обмотке возбуждения и снижение КПД. Поэтому при регулировании скорости магнитный поток машины изменяют только в меньшую сторону.

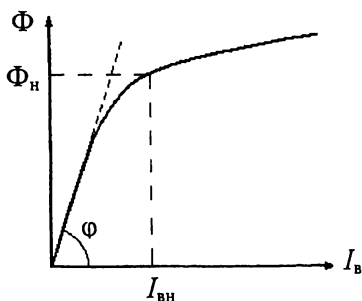


Рис. 3.4. Кривая намагничивания ДПТ

Для регулирования величины тока в цепи обмотки возбуждения применяется регулировочный реостат R_b . Если обмотка возбуждения питается от управляемого выпрямителя, то изменение тока I_b осуществляют за счет регулирования выходного напряжения выпрямителя. В реверсивных приводах при использовании выпрямителя обмотка возбуждения питается от управляемого реверсивного выпрямителя.

Уменьшение магнитного потока приводит к увеличению частоты вращения ω_0 , т.е. точка идеального холостого хода будет перемещаться вверх, при этом жесткость характеристик снижается. Величина тока короткого замыкания $I_{k3} = U/R$ от

магнитного потока не зависит, поэтому все характеристики сходятся в одном месте. Момент короткого замыкания $M_{к.3} = k\Phi I_{к.3}$ зависит от магнитного потока и при его уменьшении снижается. Электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ при изменении магнитного потока приведены на рис. 3.5.

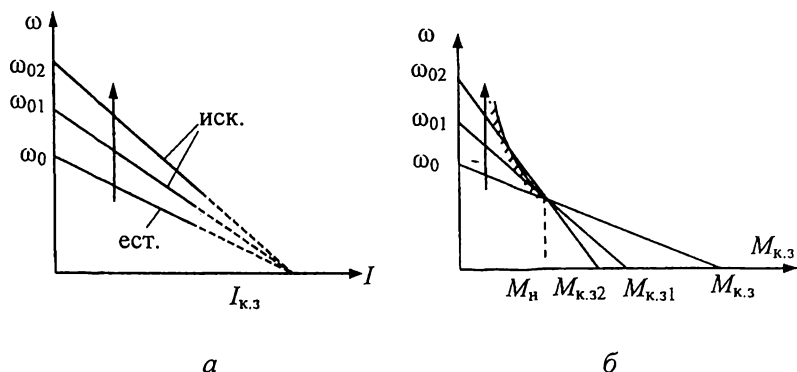


Рис. 3.5. Электромеханические (а) и механические (б) характеристики ДПТ НВ при ослаблении магнитного потока

Показатели качества регулирования:

1) диапазон регулирования небольшой и составляет $D = 3 \dots 4$;

2) направление регулирования – вверх от естественной характеристики;

3) плавность регулирования определяется плавностью регулирования I_B ;

4) стабильность скорости уменьшается, но остается достаточно высокой;

5) регулирование экономичное, так как цепь управления маломощная;

6) допустимая нагрузка оценивается при номинальном токе $I_{ном}$:

– допустимый момент двигателя $M_{доп} = k\Phi_H I_H$. Так как магнитный поток двигателя Φ_H меньше номинального потока Φ_H , то допустимый момент $M_{доп} < M_H$. Двигатель по условиям нагрева не может быть нагружен номинальным моментом. На механиче-

ских характеристиках при уменьшении магнитного потока кривая допустимого момента двигателя показана линией со штриховкой;

– *допустимая мощность* определяется выражением $M_{\text{доп}}\omega_n$. Из равенства ЭДС якоря на естественной и искусственной характеристиках при номинальном токе можно получить соотношение $\Phi_n = \Phi_n \frac{\omega_n}{\omega_n}$. Подставляя магнитный поток Φ_n в формулу $M_{\text{доп}}$, получим

$$M_{\text{доп}}\omega_n = k\Phi_n \frac{\omega_n}{\omega_n} I_n \omega_n = M_n \omega_n = P_n,$$

т.е. регулирование осуществляется при постоянной мощности двигателя.

3. Регулирование изменением величины подводимого напряжения. При регулировании скорости изменением подводимого напряжения электропривод создается на базе системы управляемый преобразователь – двигатель (УП–Д) (рис. 3.6).

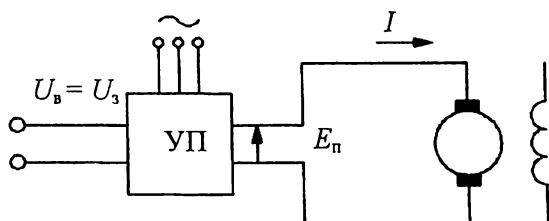


Рис. 3.6. Система управляемый преобразователь – двигатель

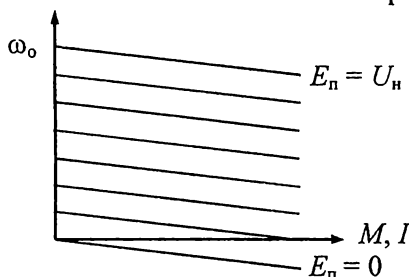
На практике применяют электромашинные и статические системы УП–Д. Электромашинной системой является система генератор – двигатель (Г–Д), она широко применялась раньше, но и сейчас еще находит достаточно широкое применение, например в металлургии. В настоящее время система УП–Д создается исключительно на базе системы тиристорный преобразователь – двигатель (ТП–Д). В таких системах напряжение на двигателе можно изменять только в меньшую сторону, так как

повышать его выше номинального недопустимо. При снижении напряжения уменьшается скорость ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{E_n}{k\Phi},$$

где E_n – ЭДС преобразователя.

Жесткость характеристик при этом остается неизменной, поэтому семейство механических характеристик представляет собой ряд параллельных линий (рис. 3.7). Однако жесткость характеристик в системе ТП–Д из-за внутреннего сопротивления преобразователя незначительно уменьшается по сравнению с жесткостью естественной характеристики одного двигателя.



Показатели качества регулирования:

- 1) диапазон регулирования $D = (8-10):1$;
- 2) регулирование плавное;
- 3) стабильность частоты при регулировании высокая, так как жесткость изменяется незначительно;
- 4) допустимая нагрузка $M_{доп} = M_n$, так как регулирование идет при $\Phi = \text{const}$;

Рис. 3.7. Характеристики ДПТ НВ при регулировании напряжения питания

5) капитальные затраты значительны, они определяются типом управляемого преобразователя, но при этом необходимо учесть, что данная система привода исключает затраты на пусковые и регулировочные резисторы.

3.3. Расчет регулировочных сопротивлений в цепи якоря ДПТ НВ

Для расчета регулировочных сопротивлений, используемых при реостатном регулировании, применяются два метода: метод пропорций и метод отрезков.

Метод пропорций основан на формуле перепада скоростей

$$\Delta\omega = \frac{IR}{k\Phi} = \frac{MR}{(k\Phi)^2} \quad (3.7)$$

Рассмотрим характеристики ДПТ НВ при реостатном регулировании скорости, представленные на рис. 3.8.

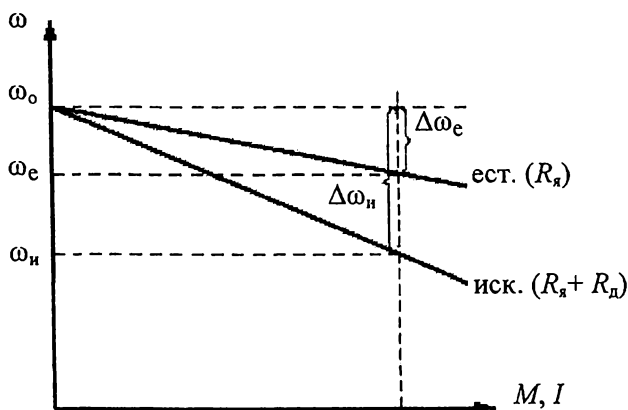


Рис. 3.8. К определению добавочных резисторов методом пропорций

Запишем отношение перепадов скоростей для естественной и искусственной электромеханических характеристик:

$$\frac{\Delta\omega_e}{\Delta\omega_{и}} = \frac{I_{и} R_{я}}{I_{и} (R_{я} + R_{д})} = \frac{R_{я}}{R_{я} + R_{д}},$$

из которого определяем величину добавочного сопротивления:

$$R_{д} = R_{я} \left(\frac{\Delta\omega_{и}}{\Delta\omega_e} - 1 \right). \quad (3.8)$$

Необходимое для определения $R_{д}$ сопротивление $R_{я}$ якорной цепи можно определить следующим образом:

- по каталогу на паспортные данные двигателя;
- экспериментально путем замера сопротивления якорной цепи;
- приближенно по номинальным данным двигателя, если принять, что потери в якорной цепи равны половине всех потерь:

$$R_{\text{я}} = \frac{0,5U_{\text{н}}(1-\eta_{\text{н}})}{I_{\text{н}}} = 0,5R_{\text{н}}(1-\eta_{\text{н}}), \quad (3.9)$$

где $R_{\text{н}}$ – номинальное сопротивление двигателя, $R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}$.

Метод отрезков не требует данных о сопротивлении $R_{\text{я}}$ якорной цепи, более того, позволяет определить его по естественной характеристике двигателя.

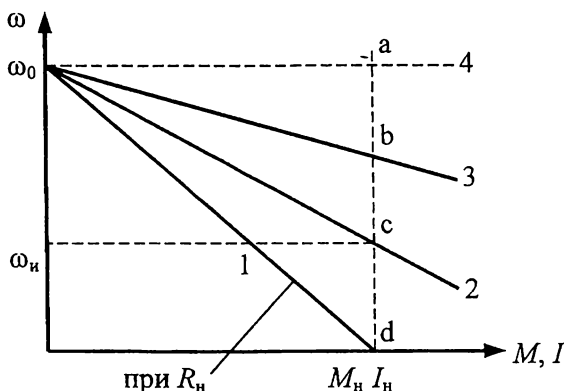


Рис. 3.9. К определению добавочных резисторов методом отрезков

Запишем выражение искусственной электромеханической характеристики 2 (рис. 3.9) при номинальных величинах $I_{\text{н}}$, $M_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$, $\Phi_{\text{н}}$:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{н}}} - \frac{I_{\text{н}}R}{k\Phi_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{н}}} \left(1 - I_{\text{н}} \frac{R}{U_{\text{н}}} \right) = \omega_0 \left(1 - \frac{R}{R_{\text{н}}} \right). \quad (3.10)$$

Откуда получим

$$\frac{R}{R_{\text{н}}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{н}}}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega_{\text{н}}}{\omega_0} = \delta_{\text{н}}, \quad (3.11)$$

где $\delta_{\text{н}}$ – относительный перепад скорости; $R_{\text{н}}$ – номинальное сопротивление двигателя; R – полное сопротивление якорной цепи.

Это выражение отражает важное свойство двигателя: *относительный перепад скорости равен относительному сопротивлению якорной цепи*.

Для координат I_n, M_n следует

$$R = R_n \frac{ac}{ad}; R_d = R_n \frac{bc}{ad}; R_{\pi} = R_n \frac{ab}{ad}. \quad (3.12)$$

3.4. Ограничение тока и момента при пуске ДПТ НВ

В переходных режимах пуска ограничиваются ток и момент до допустимых значений. Величина пускового тока не должна превышать (2–2,5) номинального тока якоря. Для ограничения тока и момента применяются добавочные сопротивления, величина которых постепенно уменьшается по мере разгона двигателя.

Рассмотрим процесс пуска двигателя (рис. 3.10). Пуск происходит при полностью введенном сопротивлении R_{π} по характеристике 1. Допустимый ток при пуске

$$I_{\text{доп}} = \frac{U}{R_{\pi}} = (2-2,5)I_n. \quad (3.13)$$

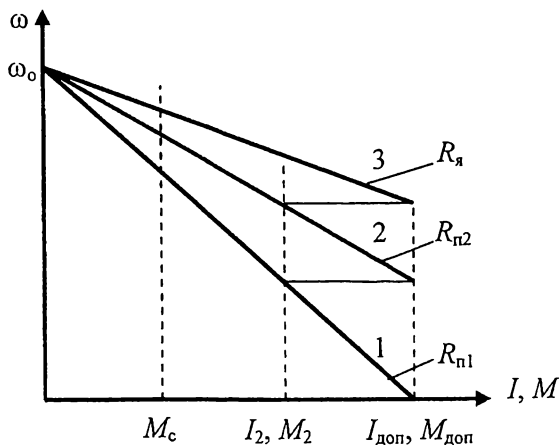


Рис. 3.10. Пусковая диаграмма ДПТ НВ

По мере разгона частота вращения ω и ЕДС якоря увеличиваются, а ток и момент снижаются. При достижении величин I_2 , M_2 ($M_2 > M_c$) первая ступень пускового реостата замыкается накоротко, и осуществляется переход на характеристику 2. После замыкания второй ступени осуществляется переход на естественную характеристику 3, по которой происходит разворот двигателя до установившегося режима. При переключениях ступеней желательно, чтобы броски тока и момента не превышали допустимых значений.

Пусковая диаграмма характеризуется пределами изменения момента двигателя, т.е. величинами M_1 и M_2 , а также числом ступеней. Чем больше ступеней, тем меньше пределы изменения моментов при пуске, тем плавнее процесс разгона двигателя. Чем больше максимальный пусковой момент M_1 , тем выше ускорение привода, и быстрее происходит пуск. Величина момента переключения M_2 должна превышать значение момента сопротивления M_c настолько, чтобы не затягивать процесс пуска.

При расчете пусковой диаграммы заданными являются допустимые ток и момент двигателя $I_{\text{доп}}$, $M_{\text{доп}}$, момент сопротивления M_c , значения тока и момента переключения I_2 , M_2 или число ступеней m

Ступени пускового реостата можно рассчитать методами отрезков и пропорций.

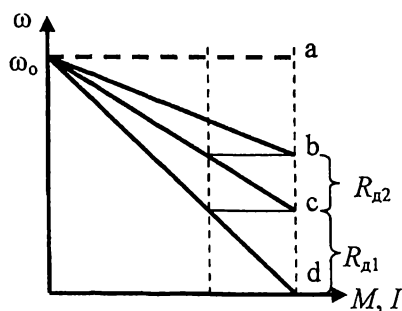


Рис. 3.11. К расчету ступеней пускового реостата методом отрезков

Метод отрезков представлен на рис. 3.11.

Сопротивление пускового реостата определяется исходя из величины пускового тока:

$$R_{\text{п1}} = \frac{U}{I_{\text{доп}}} \quad (3.14)$$

Оно складывается из сопротивления якорной цепи и сопротивлений ступеней:

$$R_{\text{п1}} = R_{\text{я}} + R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}}.$$

Сопротивления первой и второй ступени

$$R_{д1} = R_{п1} \cdot \frac{cd}{ad}; \quad R_{д2} = R_{п1} \cdot \frac{bc}{ad}. \quad (3.15)$$

Метод пропорций. Полное сопротивление якорной цепи и сопротивления ступеней определяются величинами допустимого тока и тока переключения. При этом полное сопротивление якорной цепи при работе на i ступени

$$R_{пi} = R_{п1} \left(\frac{I_2}{I_{доп}} \right)^i = R_{п1} \left(\frac{M_2}{M_{доп}} \right)^i, \quad (3.16)$$

а сопротивления ступеней

$$R_{ди} = R_{п1} \left(\frac{I_2}{I_{доп}} \right)^{i-1} \left(1 - \frac{I_2}{I_{доп}} \right) = R_{п1} \left(\frac{M_2}{M_{доп}} \right)^{i-1} \left(1 - \frac{M_2}{M_{доп}} \right), \quad (3.17)$$

где i – номер ступени.

Число ступеней переключения m может быть определено по формуле

$$m = \frac{\lg \frac{R_{я}}{R_{п1}}}{\lg \frac{I_2}{I_{доп}}} = \frac{\lg \frac{R_{я}}{R_{п1}}}{\lg \frac{M_2}{M_{доп}}}. \quad (3.18)$$

Поскольку m должно быть целым, то при известных сопротивлениях и допустимом токе можно определить ток или момент переключения.

Для любой i -й пусковой ступени изменение скорости и момента двигателя описываются выражениями

$$\begin{aligned} \omega_i &= \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст}) e^{-\frac{t}{T_{Mi}}}; \\ M_i &= M_{уст} + (M_{нач} - M'_{уст}) e^{-\frac{t}{T_{Mi}}}, \end{aligned} \quad (3.19)$$

где T_{Mi} – электромеханическая постоянная времени привода, соответствующая i -й пусковой характеристике, $T_{Mi} = J/\beta_i$; β_i – жесткость i -й пусковой характеристики, $\beta_i = \Delta\omega_i / \Delta M_i$.

Время работы двигателя на i -й пусковой ступени при изменении момента от $M_{\text{доп}}$ до M_2 пропорционально электромеханической постоянной времени, соответствующей данной ступени:

$$t_i = T_{Mi} \ln \frac{M_{\text{доп}} - M_c}{M_2 - M_c} \quad (3.20)$$

Полное время пуска, за окончание которого принимается достижение скорости, соответствующей моменту M_2 на естественной характеристике, определится как сумма интервалов времени работы на всех ступенях, включая работу на естественной характеристике

$$t_n = \sum T_{Mi} \ln \frac{M_{\text{доп}} - M_c}{M_2 - M_c} . \quad (3.21)$$

3.5. Способы торможения ДПТ НВ

Тормозные режимы применяются для экстренной остановки механизма в аварийных ситуациях или используются как рабочий режим электропривода. Сущность электрических способов торможения состоит в том, что в тормозных режимах электромагнитный момент двигателя направлен против движения механизма.

В электроприводе с ДПТ НВ применяются три способа торможения: рекуперативное, динамическое и противовключение.

Рекуперативное торможение происходит в случае, когда угловая скорость двигателя ω превысит скорость идеального холостого хода ω_0 . При этом ЭДС обмотки якоря E станет больше напряжения сети U , и ток в якоре и момент двигателя изменят свое направление. Двигатель переходит в генераторный режим работы параллельно с сетью, при котором кинетическая энергия движения привода преобразуется в электрическую энергию и отдается в сеть. Этот способ торможения служит не для остановки механизма, а для его подтормаживания, и применяется как рабочий режим при спуске груза в подъемных кранах или при движении электрического транспорта под уклон. Механические характеристики при рекуперативном торможении являются

продолжением характеристик двигателя режима и находятся во II квадранте поля координат $\omega - M$ при прямой полярности напряжения и в IV квадранте — при обратной полярности напряжения.

При динамическом торможении обмотка якоря двигателя отключается от сети и включается на внешнее добавочное сопротивление $R_{д.т.}$. Двигатель становится автономным генератором, который работает на нагрузку $R_{д.т.}$. Схема включения двигателя при динамическом торможении приведена на рис. 3.12.

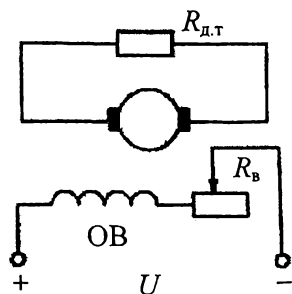


Рис. 3.12. Схема динамического торможения ДПТ НВ

Уравнение электромеханической характеристики ДПТ НВ при динамическом торможении с учетом $U = 0$ имеет вид

$$\omega = -\frac{IR}{k\Phi}, \quad (3.22)$$

а уравнение механической характеристики —

$$\omega = -\frac{MR}{(k\Phi)^2} \quad (3.23)$$

Все характеристики проходят через начало координат. Жесткость характеристик зависит от величины внешнего добавочного сопротивления и магнитного потока двигателя. Изменяя эти величины, можно формировать процесс торможения привода.

Величина добавочного сопротивления определяется допустимым током якоря и рассчитывается по выражению

$$R_{д.т.} = \frac{E}{I_{доп}} - R_{я} = \frac{k \omega \Phi}{I_{доп}} - R_{я}, \quad (3.24)$$

где по условиям нормальной работы коллекторного узла принимают $I_{доп} = (2 - 2,5) I_{я.н.}$.

Влияние величины добавочного сопротивления $R_{д.т}$ на процесс динамического торможения показано на механических характеристиках рис. 3.13, а влияние величины магнитного потока Φ двигателя – на характеристиках рис. 3.14.

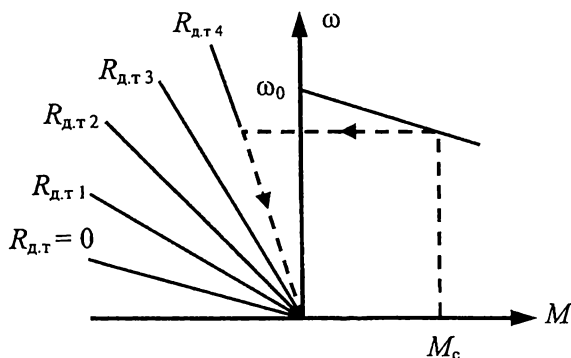


Рис. 3.13. Процесс динамического торможения при изменении добавочного сопротивления ($R_{д.т4} > R_{д.т3} > R_{д.т2} > R_{д.т1}$)

Динамическое торможение используется как аварийное торможение при исчезновении напряжения питания.

Недостатком динамического торможения является то, что при малых угловых скоростях вращения ω недостаточна величина тормозного момента M_t , развиваемого двигателем при торможении.

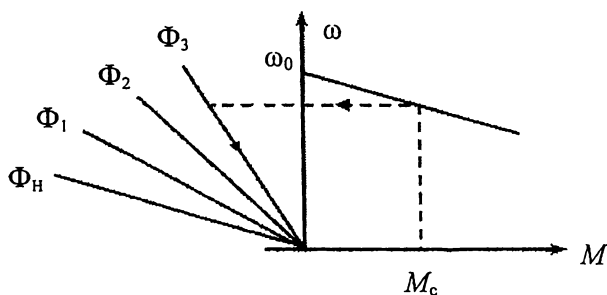


Рис. 3.14. Процесс динамического торможения при изменении магнитного потока ($\Phi_H > \Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$)

Торможение противоключением осуществляется путем реверса двигателя или переводом его в режим электромагнитного тормоза (режим протягивающего груза).

Реверс двигателя можно осуществлять двумя способами: изменением направления тока возбуждения или изменением полярности подводимого к якорю напряжения.

На практике чаще применяется второй способ. На рис. 3.15 приведена реверсивная схема включения ДПТ НВ с изменением полярности напряжения питания. В исходном состоянии контакты В (вперед) и Н (назад) разомкнуты. При замыкании контактов В двигатель подключается к сети для вращения в прямом направлении, а при замыкании контактов Н — для вращения в обратном направлении.

При изменении полярности подводимого напряжения ток в цепи якоря двигателя

$$I_{\text{я}} = \frac{-U - E}{R} \approx \frac{|2U|}{R}, \quad (3.25)$$

т.е. примерно в 2 раза больше, чем при пуске двигателя. Поэтому при реверсе добавочное сопротивление в цепи якоря должно быть больше пускового в 2 раза.

Величина добавочного сопротивления определяется по выражению

$$R_{\text{д}} = 2 U / I_{\text{доп}} - R_{\text{я}}. \quad (3.26)$$

Введение большого сопротивления приводит к уменьшению жесткости механических характеристик при торможении противоключением. Процесс торможения представлен на рис. 3.16. При реверсе двигатель из режима, соответствующего точке А, переходит при $\omega = \text{const}$ в режим, соответствующий

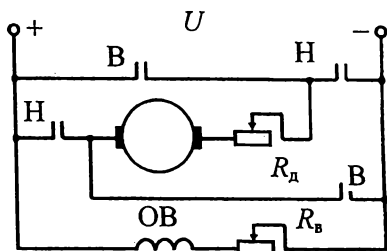


Рис. 3.15. Реверсивная схема включения ДПТ НВ

точке A' . Ток якоря изменяет свое направление, двигатель начинает работать в генераторном режиме и создает тормозной момент M_T , под действием которого привод тормозится до полной остановки. В точке C при $\omega = 0$ двигатель отключается, иначе произойдет разгон двигателя в противоположную сторону.

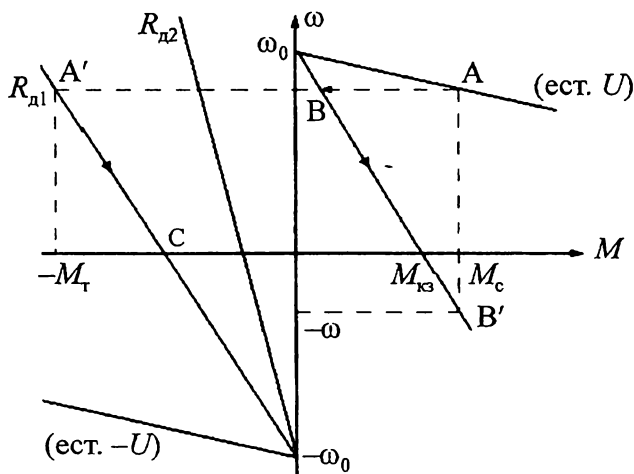


Рис. 3.16. Торможение ДПТ НВ противовключением ($R_{д2} > R_{д1}$)

Торможение противовключением широко используется в приводе подъемных механизмов как рабочий режим для спуска груза (режим протягивающего груза). Двигатель в этом случае включают на подъем груза, а в якорную цепь вводят большое добавочное сопротивление R_d , при котором $M_{кз} < M_c$. При введении добавочного сопротивления появляется отрицательный динамический момент, и привод начинает тормозиться. Процесс торможения идет по пути $A-B-B'$. Точка B' в IV квадранте характеризует установившийся режим опускания груза со скоростью $-\omega$.

Глава 4

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

4.1. Электромеханические свойства ДПТ ПВ

Двигатели с последовательным возбуждением (ДПТ ПВ) находят широкое применение для ЭП транспортных и подъемно-транспортных механизмов. Достоинством двигателей является их высокая перегрузочная способность на низких скоростях. Например, в пусковом режиме при перегрузке по току в 2–2,5 раза пусковой момент составляет $(3\text{--}3,5)M_n$.

Схема включения двигателя приведена на рис. 4.1.

Особенностью двигателей является то, что ток якоря является одновременно током возбуждения, т.е. магнитный поток двигателя является функцией тока нагрузки – $\Phi(I)$. С учетом этого электромеханическая характеристика двигателя имеет вид

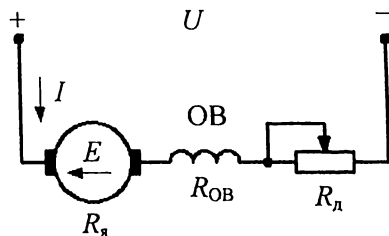


Рис. 4.1. Схема включения ДПТ ПВ

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{IR}{k\Phi(I)}, \quad (4.1)$$

а механическая –

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{MR}{(k\Phi(I))^2}, \quad (4.2)$$

где R – полное сопротивление якорной цепи, $R = R_{\text{я}} + R_{\text{ОВ}} + R_{\text{л}}$.

Очень часто магнитный поток двигателя считают линейно зависимым от тока. При линейной аппроксимации магнитного потока $\Phi = \alpha I$, где $\alpha = \text{tg } \varphi$ (см. рис. 3.4), электромеханическая характеристика ДПТ ПВ

$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha}, \quad (4.3)$$

а механическая характеристика

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha}. \quad (4.4)$$

Асимптотой характеристик при стремлении тока и момента к нулю является ось ординат со значением скорости $\omega = \infty$, а при стремлении тока и момента к бесконечности асимптотой характеристик будет линия со значением скорости $\omega = -R/(k\alpha)$ (рис. 4.2).

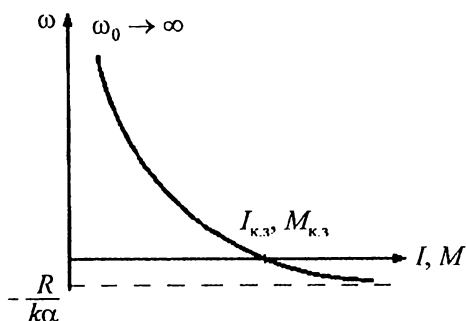


Рис. 4.2. Электромеханическая $\omega(I)$ и механическая $\omega(M)$ характеристики ДПТ ПВ

Для этих двигателей недопустим режим холостого хода. Так как характеристики не пересекают ось ординат, то отсутствует режим рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть.

Основные режимы работы:

– двигательный режим $0 < \omega < \infty$; в этом режиме отметим режим короткого замыкания при $\omega = 0$, который характеризует пусковые свойства двигателя;

– тормозной режим (динамическое торможение и торможение противовключением).

Простейшая аппроксимация зависимости магнитного потока Φ от тока I приводит к большим погрешностям, поэтому на практике используют универсальные характеристики.

Универсальные характеристики (рис. 4.3) представляют собой графики зависимостей скорости и момента от тока, данные в относительных единицах:

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}; \quad I^* = \frac{I}{I_{\text{ном}}}; \quad M^* = \frac{M}{M_{\text{ном}}}. \quad (4.5)$$

Рассмотрим использование универсальных характеристик для получения реальных характеристик двигателя. По паспортным данным двигателя $P_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$, $U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$ определяем номинальную угловую скорость вращения $\omega_{\text{ном}} = \frac{2\pi n_{\text{ном}}}{60}$, рад/с, и но-

минальный электромагнитный

момент $M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}}$, Н·м. За-

тем, используя универсальные характеристики, рассчитываем действительные величины скорости $\omega = \omega^* \omega_{\text{ном}}$,

момента $M = M^* M_{\text{ном}}$ и тока

двигателя $I = I^* I_{\text{ном}}$ и строим характеристики.

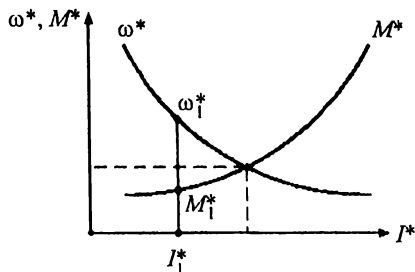


Рис. 4.3. Универсальные характеристики ДПТ ПВ

4.2. Регулирование координат электропривода на базе ДПТ ПВ

В электроприводе на базе ДПТ ПВ применяют три способа регулирования скорости:

- реостатное регулирование путем введения сопротивления R_d в якорную цепь;
- регулирование изменением магнитного потока Φ ;
- якорное регулирование путем изменения подводимого напряжения U .

Реостатное регулирование осуществляют с помощью добавочного сопротивления, включаемого в цепь якоря двигателя. Способ регулирования отличается простотой реализации. Анализ зависимостей $\omega(I)$ и $M(I)$ показывает, что с ростом добавочного сопротивления R_d искусственные характеристики располагаются ниже естественной.

Показатели качества регулирования:

- диапазон регулирования $D = (2-3):1$;
- плавность регулирования зависит от плавности изменения добавочных сопротивлений, как правило, регулирование ступенчатое;
- регулирование однозонное вниз от естественной характеристики;
- стабильность и жесткость характеристик снижаются с ростом сопротивления;
- регулирование осуществляется при допустимой нагрузке, равной номинальному моменту;

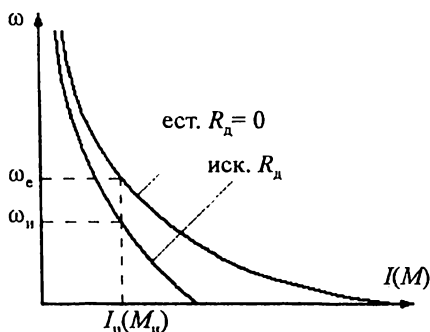


Рис. 4.4. Характеристики ДПТ ПВ при реостатном регулировании скорости

– регулирование скорости сопровождается дополнительными потерями мощности в добавочном сопротивлении, поэтому способ экономически целесообразен только при небольшом диапазоне регулирования или кратковременной работе на пониженной скорости.

Характеристики при реостатном регулировании скорости показаны на рис. 4.4.

Расчет добавочных сопротивлений проводится по известной естественной характеристике. Используя выражение скоростной характеристики, запишем отношение скоростей на искусственной и естественной характеристиках при одном и том же токе I_n :

$$\frac{\omega_n}{\omega_e} = \frac{\frac{U_n - I_n (R_{\text{я}} + R_{\text{ов}} + R_{\text{д}})}{k\Phi(I)}}{\frac{U_n - I_n (R_{\text{я}} + R_{\text{ов}})}{k\Phi(I)}} = \frac{U_n - I_n (R_{\text{я}} + R_{\text{ов}} + R_{\text{д}})}{U_n - (R_{\text{я}} + R_{\text{ов}})}.$$

Откуда получим выражение для определения добавочного сопротивления:

$$R_{\text{д}} = \left(1 - \frac{\omega_{\text{и}}}{\omega_{\text{с}}}\right) \cdot \left(\frac{U_{\text{и}}}{I_{\text{и}}} - R_{\text{я}} - R_{\text{д}}\right). \quad (4.6)$$

Входящие в это выражение значения $R_{\text{я}}$ и $R_{\text{ов}}$ находим приближенно по паспортным данным двигателя:

$$R_{\text{я}} + R_{\text{ов}} \approx 0,75 U_{\text{и}} \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{I_{\text{и}}}. \quad (4.7)$$

Если задана механическая характеристика, то первоначально, по величине момента $M_{\text{и}}$, используя универсальные характеристики, определяем значение тока $I_{\text{и}}$, а затем вычисляем добавочное сопротивление по приведенному выше выражению.

Регулирование скорости изменением магнитного потока Φ может осуществляться двумя способами:

- шунтированием обмотки возбуждения;
- шунтированием обмотки якоря.

Схема включения ДПТ ПВ при *шунтировании обмотки возбуждения* приведена на рис. 4.5. При наличии шунта для токов схемы можно записать

$$I_{\text{я}} = I_{\text{в}} + I_{\text{ш}}. \quad (4.8)$$

Из этого следует, что часть тока якоря замыкается через шунт, при этом ток возбуждения $I_{\text{в}}$, а следовательно, и магнитный поток Φ двигателя уменьшаются. Снижение потока Φ вызывает увеличение скорости ω двигателя и снижение жесткости характеристик, и тем большее, чем меньше магнитный поток. Искусственные характеристики при этом располагаются выше естественной характеристики (рис. 4.6).

Показатели качества регулирования скорости совпадают с показателями ДПТ НВ.

Схема ДПТ ПВ при *шунтировании обмотки якоря* приведена на рис. 4.7. Для токов схемы можно записать

$$I_{\text{в}} = I_{\text{я}} + I_{\text{ш}}, \quad (4.9)$$

где ток, протекающий через шунт, $I_{\text{ш}} = U/R_{\text{ш}}$.

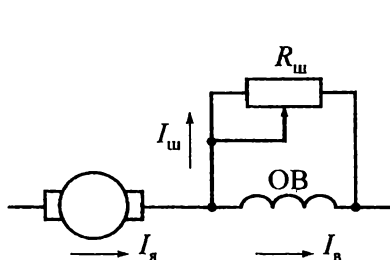


Рис. 4.5. Схема ДПТ ПВ при шунтировании обмотки возбуждения ($I_{\text{я}} = I_{\text{в}} + I_{\text{ш}}$)

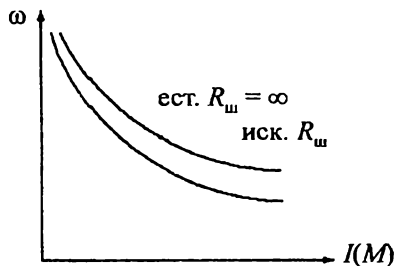


Рис. 4.6. Характеристики ДПТ ПВ при шунтировании обмотки возбуждения

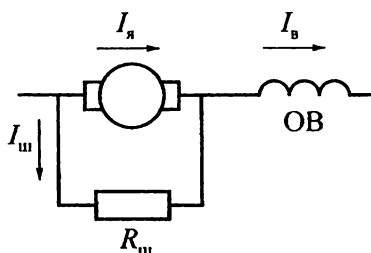


Рис. 4.7. Схема ДПТ ПВ при шунтировании обмотки якоря ($I_{\text{в}} = I_{\text{я}} + I_{\text{ш}}$)

Из этого следует, что при наличии шунта ток возбуждения $I_{\text{в}}$ и магнитный поток Φ двигателя возрастают. Увеличение потока Φ вызывает снижение скорости ω двигателя, и тем большее, чем больше поток. Искусственные характеристики получаются жестче и располагаются ниже естественной характеристики (рис. 4.8).

Из уравнения токов следует, что при $I_{\text{я}} = 0$ ток возбуждения $I_{\text{в}} = I_{\text{ш}}$, т.е. в токе возбуждения есть составляющая, независимая от тока якоря (нагрузки). Магнитный поток двигателя не равен нулю, поэтому он приобретает свойства двигателя со смешанным возбуждением и имеет устойчивую скорость холостого хода ω_0 при $I = 0$.

Рассмотрим электромеханические характеристики. При скорости больше ω_0 ток в якоре меняет свое направление

($E_{\text{я}} > U$), и это приводит к размагничиванию двигателя. При токе якоря $I_{\text{я}} = -U/R_{\text{ш}}$ ток возбуждения $I_{\text{в}}$ и магнитный поток Φ равны нулю, поэтому скорость двигателя стремится к бесконечности.

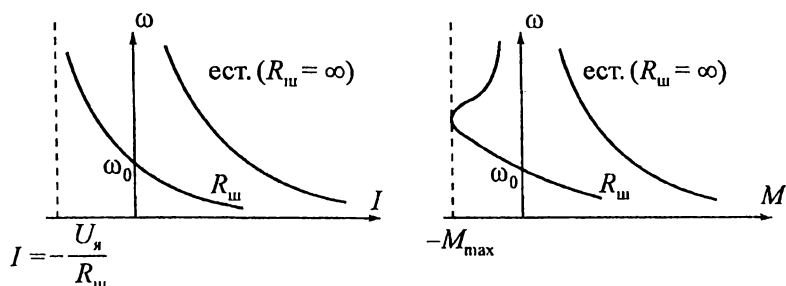


Рис. 4.8. Характеристики ДПТ ПВ при шунтировании обмотки якоря

При анализе механических характеристик учтем формулу момента двигателя. При скорости ω_0 ток I равен нулю, поэтому момент $M = 0$, а при скорости ω , стремящейся к бесконечности, магнитный поток $\Phi = 0$, и поэтому момент $M = 0$. В интервале изменения скорости от ω_0 до бесконечности момент M имеет некоторый максимум M_{max} .

Таким образом, особенностью искусственных характеристик ДПТ ПВ при шунтировании обмотки якоря является то, что они пересекают ось ординат и проходят также во втором квадранте поля координат $\omega - M$. Это позволяет осуществлять рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть.

Регулирование изменением подводимого напряжения применяется в случае питания двигателя от регулируемого источника напряжения (рис. 4.9).

В качестве такого источника может быть использован какой-либо регулятор напряжения (РН). Изменять напряжение можно только в сторону уменьшения, поэтому искусственные характеристики располагаются ниже естественной. Ха-

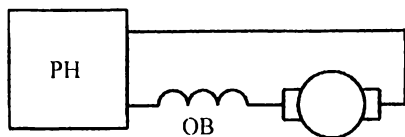


Рис. 4.9. Схема питания ДПТ ПВ от регулятора напряжения

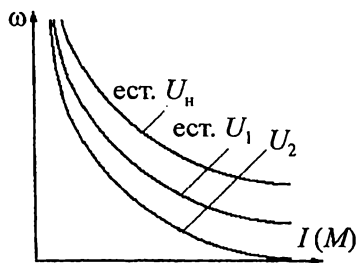


Рис. 4.10. Характеристики ДПТ ПВ при изменении подводимого напряжения U ($U_n > U_1 > U_2$)

рактические характеристики ДПТ ПВ при изменении подводимого напряжения U показаны на рис. 4.10.

Показатели качества регулирования скорости аналогичны показателям привода ДПТ НВ за исключением жесткости характеристик и стабильности скорости.

4.3. Тормозные режимы электропривода с ДПТ ПВ

Для торможения привода с ДПТ ПВ применяют два способа: динамическое торможение и торможение противовключением.

Динамическое торможение может осуществляться по схеме с независимым возбуждением или по схеме с самовозбуждением.

При динамическом торможении по схеме с независимым возбуждением обмотка возбуждения двигателя подключается к независимому источнику, а обмотка якоря замыкается на гасящее сопротивление. Механические характеристики при торможении по существу повторяют характеристики ДПТ НВ (см. рис. 3.13, 3.14).

Динамическое торможение с самовозбуждением проводится по схеме, приведенной на рис. 4.11. Контакты КМ в схеме осуществляют подключение двигателя к сети для работы в нормальном двигательном режиме. Контакты КТ и резистор R_d используются при торможении. Для осуществления торможения с самовозбуждением необходимо выполнение следующих условий:

- наличие остаточного магнитного потока;
- совпадение остаточного потока с основным магнитным потоком, создаваемым обмоткой возбуждения;

– полное сопротивление в цепи якоря должно быть меньше критического.

Процесс торможения происходит следующим образом. При размыкании контактов КМ цепь якоря разрывается и ток возбуждения (ток якоря) становится равным нулю. Затем замыкаются контакты КТ. Под действием остаточного магнитного потока в якоре будет наводиться ЭДС, и в замкнутой цепи «якорь – обмотка возбуждения ОВ – резистор R_d » появится ток. Ток возбуждения при этом сохранит свое первоначальное направление, обеспечивая режим самовозбуждения. Двигатель превращается в генератор и тормозится.

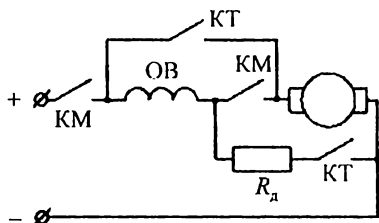


Рис. 4.11. Схема динамического торможения ДПТ ПВ с самовозбуждением

Характеристики двигателя в режиме торможения при различных сопротивлениях R_d показаны на рис. 4.12. Процесс торможения идет по пути $A-A'-\omega_{гр}$, где $\omega_{гр}$ – минимальная скорость, при которой еще возможен процесс самовозбуждения.

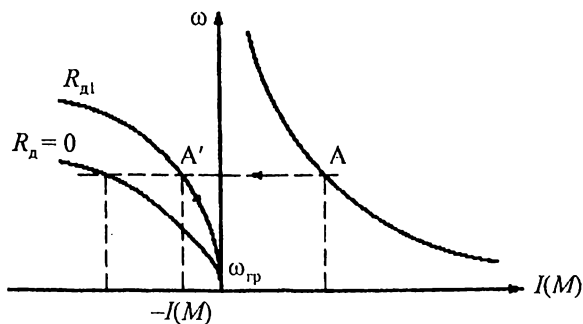


Рис. 4.12. Характеристики ДПТ ПВ при динамическом торможении с самовозбуждением

Торможение противовключением осуществляется путем изменения полярности напряжения на обмотке якоря при сохранении направления тока в обмотке возбуждения (рис. 4.13) или наоборот.

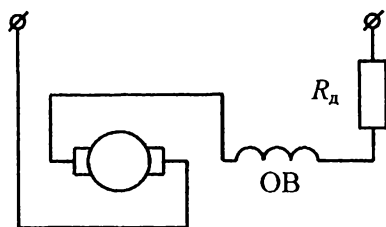


Рис. 4.13. Схема торможения ДПТ
ПВ противовключением

Механические характеристики при торможении противовключением представлены на рис. 4.14. При изменении полярности напряжения ЭДС якоря и напряжение U действуют согласно, поэтому для ограничения тока в режиме торможения в цепь якоря включают добавочное сопротивление R_d . Процесс торможения идет по линии А–А'–С, в точке С двигатель отключают от сети, иначе произойдет разгон в другую сторону. Процесс торможения можно формировать изменением добавочного сопротивления.

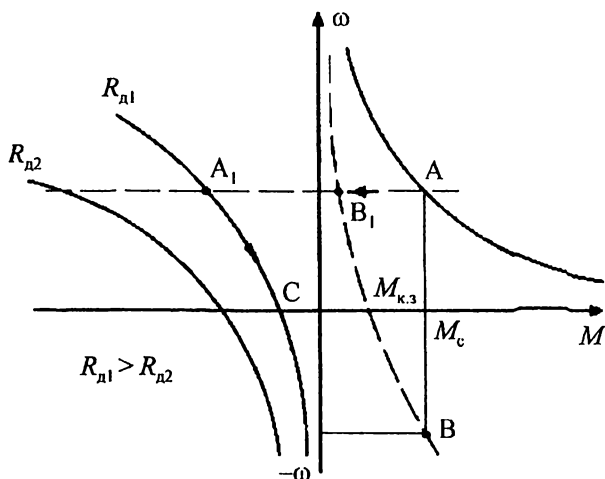


Рис. 4.14. Характеристики ДПТ последовательного
возбуждения при торможении противовключением

Торможение противовключением может быть использовано также для опускания груза (режим протягивающего груза), т.е. как рабочий режим. В этом случае двигатель включают на подъем груза, а для перевода двигателя в режим электромагнитного

тормоза в якорную цепь вводят большое добавочное сопротивление R_d , при котором $M_{к.з} < M_c$. Процесс торможения идет по пути А–В'–В. Точка В в IV квадранте характеризует режим опускания груза со скоростью $-\omega$.

4.4. Электропривод с двигателями смешанного возбуждения

Двигатели этого типа имеют *независимую обмотку возбуждения*, подключаемую к источнику питания, и *последовательную обмотку возбуждения*, включаемую последовательно с обмоткой якоря. Вследствие этого двигатель имеет характеристики и свойства, присущие двигателю постоянного тока как с независимым, так и с последовательным возбуждением. При слабой последовательной обмотке возбуждения они будут приближаться к характеристикам двигателя с независимым возбуждением, а при сильной – к характеристикам двигателя с последовательным возбуждением.

Электромеханические и механические характеристики двигателя определяются по тем же формулам, что и ранее. Для практических расчетов используются универсальные характеристики, подобные характеристикам ДПТ ПВ.

Двигатель со смешанным возбуждением может работать во всех энергетических режимах, его характеристики располагаются во всех квадрантах поля координат ω – M . Регулирование координат электропривода с таким двигателем осуществляется изменением напряжения, магнитного потока и добавочного сопротивления в цепи якоря.

Глава 5 ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО СИСТЕМЕ УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ

5.1. Электропривод по системе генератор – двигатель (Г–Д)

Система Г–Д (рис. 5.1) состоит из трех машин:

– приводного двигателя, в качестве которого используются АД или СД;

- генератора Г, являющегося источником регулируемого напряжения;
- двигателя Д, подключенного к зажимам генератора.

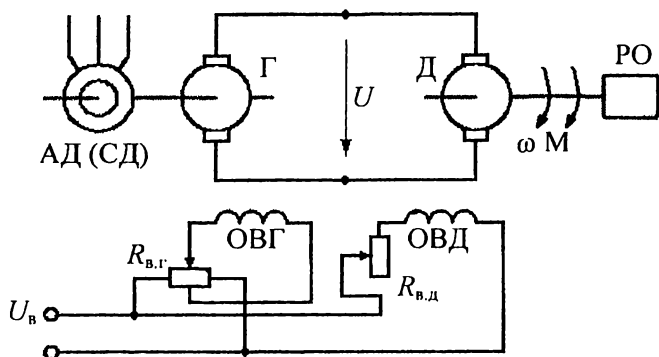


Рис. 5.1. Принципиальная схема системы Г–Д

Механическая мощность двигателя передается рабочему органу РО механизма. Обмотки возбуждения генератора и двигателя могут питаться от одного источника независимого возбуждения. Ток возбуждения в двигателе регулируется реостатом $R_{в.д}$, а ток возбуждения в генераторе – реостатом $R_{в.г}$. Реостат $R_{в.г}$, выполненный по схеме потенциометра, позволяет изменять направление тока возбуждения генератора. Скорость приводного двигателя можно считать постоянной, поэтому напряжение U генератора изменяется в зависимости от тока возбуждения генератора.

Система Г–Д позволяет получать механические характеристики во всех четырех квадрантах поля ω – M (рис. 5.2).

Характеристики двигательного режима системы Г–Д при прямой полярности напряжения U расположены в квадранте I. При изменении полярности подводимого напряжения характеристики располагаются в квадранте III.

Область 1 – якорное регулирование скорости двигателя Д при изменении подводимого напряжения. Жесткость характери-

стик незначительно снижается за счет сопротивления цепи якоря генератора. Обычно мощность генератора чуть больше мощности двигателя, поэтому жесткость характеристик β уменьшается примерно в 2 раза. Регулирование плавное, вниз от естественной характеристики. Можно получить двухзонное регулирование за счет уменьшения магнитного потока двигателя – область 2.

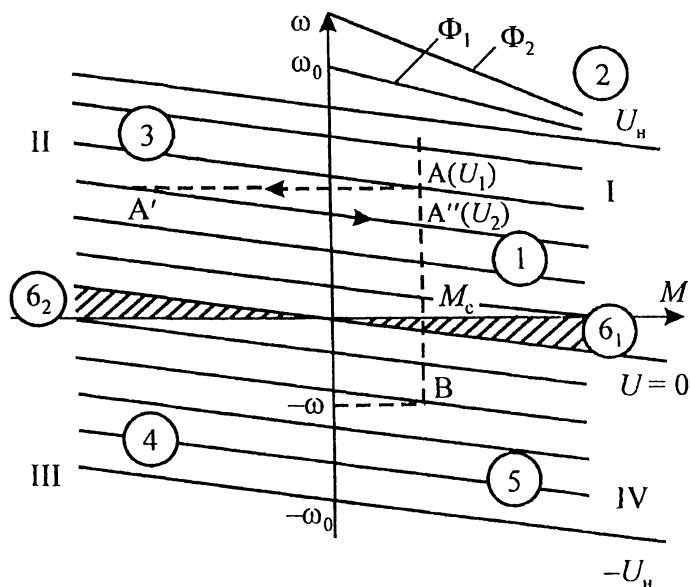


Рис. 5.2. Механические характеристики системы Γ -Д
($\Phi_2 < \Phi_1 < \Phi_n$)

Область 3 (квадрант II) – это область рекуперативного торможения, при котором двигатель Д становится генератором, а генератор Γ – двигателем. При рекуперативном торможении генератор Γ преобразует электрическую энергию, потребляемую от двигателя Д, в механическую энергию и передает ее приводному двигателю. Приводной двигатель преобразует поступающую к нему механическую энергию в электрическую энергию и отдает ее в сеть.

Рассмотрим процесс рекуперативного торможения. Установившийся двигательный режим при U_1 соответствует точке А. Уменьшим ток возбуждения генератора для снижения напряжения до U_2 ($U_2 < U_1$). Скорость двигателя мгновенно измениться не может, поэтому ЭДС двигателя сохраняет свое значение. Напряжение U_2 генератора становится меньше ЭДС двигателя, поэтому двигатель Д становится генератором, а генератор Г – двигателем. Происходит переход в точку А' на искусственную характеристику при U_2 . Момент двигателя становится отрицательным, и система тормозится по линии А'–А'' Участок торможения с отрицательным моментом соответствует рекуперативному торможению с отдачей энергии в сеть.

Область 4 (квадрант III) – двигательный режим при обратной полярности подводимого напряжения.

Область 6 – торможение противовключением: область 6₁ – торможение противовключением в режиме протягивающего груза при прямой полярности напряжения. Двигатель включен на подъем груза, но груз опускается, так как $M_{кз} < M_c$; область 6₂ – торможение противовключением при другой полярности напряжения.

Режим динамического торможения привода представлен характеристикой при напряжении $U = 0$.

Область 5 (квадрант IV) – рекуперативное торможение в режиме протягивающего груза при обратной полярности подводимого напряжения. Движущим моментом является вес груза, машина включается на напряжение обратной полярности и работает в режиме генератора, создавая тормозной момент (точка В). Особенностью этого режима является возможность работы на пониженных скоростях.

Система Г–Д находит широкое применение в металлургии.

Положительные свойства системы:

- большой диапазон регулирования скоростей;
- двухзонное регулирование скорости в режиме двигателя;
- плавность регулирования скорости;
- большая жесткость характеристик;

– возможность получения всех энергетических режимов.

Недостатки системы:

- значительная установленная мощность машин (не менее $3,5 P_n$);
- низкий КПД привода в целом;
- значительная инерционность переходных процессов из-за большого количества машин.

5.2. Электропривод по системе тиристорный преобразователь – двигатель

5.2.1. Силовые схемы преобразователей и принцип их работы

Функцию управляемого преобразователя в системе тиристорный преобразователь – двигатель (ТП–Д) выполняют тиристорные преобразователи. Схемы некоторых применяемых на практике преобразователей представлены на рис. 5.3.

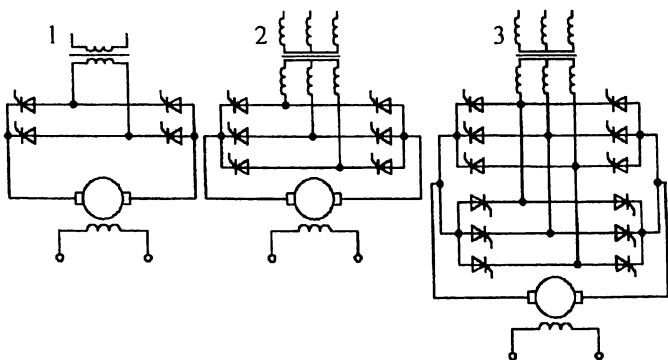


Рис. 5.3. Силовые схемы электроприводов ТП – Д: 1 – однофазная мостовая нереверсивная; 2 – трехфазная мостовая нереверсивная; 3 – трехфазная мостовая реверсивная встречно-параллельная

Управление тиристорами в схемах тиристорных преобразователей (ТП) осуществляется системами импульсно-фазового управления (СИФУ). При подаче управляющего импульса тири-

стор открывается и закрывается только после изменения полярности питающего напряжения и спада тока до нуля. Угол управления тиристора α отсчитывается от начала естественного открытия тиристора, т.е. от момента времени, когда напряжение на тиристоре переходит через нуль и становится положительным.

Преобразователь в электроприводе по системе ТП–Д выполняет две функции:

- выпрямления переменного тока;
- регулирования средней величины выпрямленного напряжения.

Принцип регулирования среднего значения выпрямленного напряжения показан на рис. 5.4 на примере однофазной мостовой схемы выпрямления.

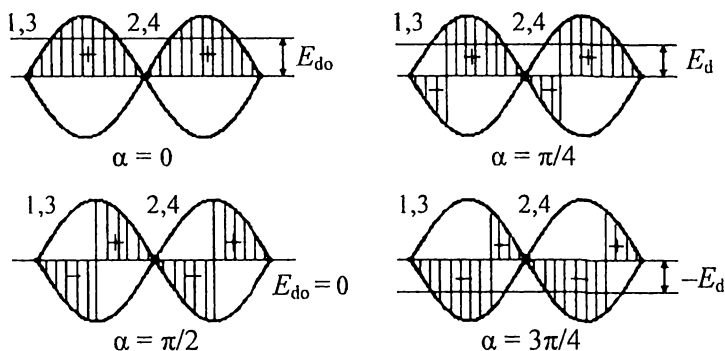


Рис. 5.4. Регулирование напряжения ТП при изменении угла α

При $\alpha = 0$ в течение всей положительной полуволны переменного напряжения открыты тиристоры 1 и 3, а в течение всей отрицательной полуволны – тиристоры 2 и 4. Среднее значение выпрямленного напряжения определяется заштрихованной площадью и будет максимальным и равным

$$E_{d0} = k_{cx} U_n, \quad (5.1)$$

где U_n – линейное напряжение на стороне переменного тока; k_{cx} – коэффициент схемы выпрямления: для однофазной мостовой

вой схемы $k_{cx} = 0,9$, для трехфазной мостовой схемы $k_{cx} = 1,35$, для трехфазной нулевой схемы $k_{cx} = 0,675$.

При $\alpha > 0$ тиристор открывается позже начала естественного открытия. Среднее значение напряжения уменьшается и определяется по выражению

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha. \quad (5.2)$$

Тиристоры 1 и 3 будут проводить ток до тех пор, пока не откроются тиристоры 2 и 4, т.е. и в то время, когда напряжение анод – катод будет отрицательным. Это объясняется тем, что преобразователь работает на индуктивность, и в этом случае ток протекает за счет ЭДС самоиндукции якоря. Если бы преобразователь работал на активную нагрузку, то тиристоры закрылись бы при прохождении напряжения через нуль. В этом случае был бы режим прерывистых токов.

При $\alpha = \pi/2$ среднее значение выпрямленного напряжения равно нулю. При большем угле α среднее значение напряжения становится отрицательным, и преобразователь переходит в инверторный режим.

Таким образом, ТП может работать в выпрямительном и инверторном режимах.

5.2.2. Режимы работы тиристорных преобразователей

Схема цепи выпрямленного тока при работе ТП в выпрямительном режиме приведена на рис. 5.5, а, где E_d – среднее значение выпрямленного напряжения; ИВ – идеальный клапан; R_{Π} – внутреннее сопротивление источника; U – напряжение на двигателе; I – ток якоря; $R_{я}$, $E_{я}$ – параметры цепи якоря.

Выпрямительный режим работы преобразователя обеспечивается при угле управления тиристора $\alpha = 0 \dots \pi/2$, ЭДС преобразователя E_d должна быть больше ЭДС якоря $E_{я}$. Машина постоянного тока работает двигателем и ее ЭДС $E_{я}$ направлена против тока I .

Инверторный режим работы ТП осуществляется при углах $\alpha = \pi/2 \dots 11\pi/12$, при этом ЭДС преобразователя E_d меняет свой

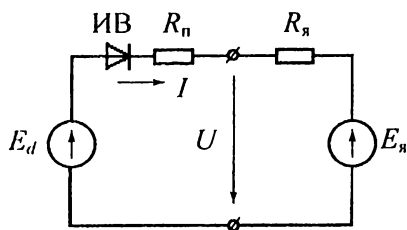


Рис. 5.5. Схема цепи выпрямленного тока при работе преобразователя в выпрямительном режиме

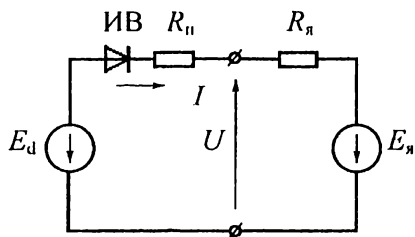


Рис. 5.6. Схема цепи выпрямленного тока при работе преобразователя в инверторном режиме

знак. Ввиду односторонней проводимости тиристоры ток в преобразователе при отрицательном напряжении протекать не может, поэтому инверторный режим возможен при следующих условиях:

- в цепи выпрямленного тока должен быть источник, величина ЭДС которого должна быть больше среднего значения выпрямленного напряжения инвертора: $E_я > |E_d|$;
- направление ЭДС якоря $E_я$ должно быть изменено на противоположное, чтобы обеспечить протекание тока в цепи в прежнем направлении под действием этой ЭДС;

– угол открытия тиристора α должен быть больше $\pi/2$.

Схема цепи выпрямленного тока при работе преобразователя в инверторном режиме приведена на рис. 5.6.

При работе ТП в инверторном режиме двигатель работает генератором, вырабатывая энергию постоянного тока, которая преобразуется инвертором в энергию переменного тока и отдается в сеть. Инверторный режим используется в приводах для осуществления рекуперативного торможения двигателя в режиме протягивающего груза.

5.2.3. Механические характеристики неперевсивного привода ТП–Д

Внешняя характеристика ТП как источника энергии имеет вид

$$U = E_d - IR_n = E_{d0} \cos \alpha - IR_n. \quad (5.3)$$

Уравнение механической характеристики двигателя в приводе ТП-Д

$$\omega = \frac{E_{d0} \cos \alpha}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}}{(k\Phi)^2} M \quad (5.4)$$

Механические характеристики нереверсивного привода приведены на рис. 5.6. Характеристики расположены только в I и IV квадрантах поля ω - M и не пересекают ось ординат, что объясняется односторонней проводимостью тириستоров ТП.

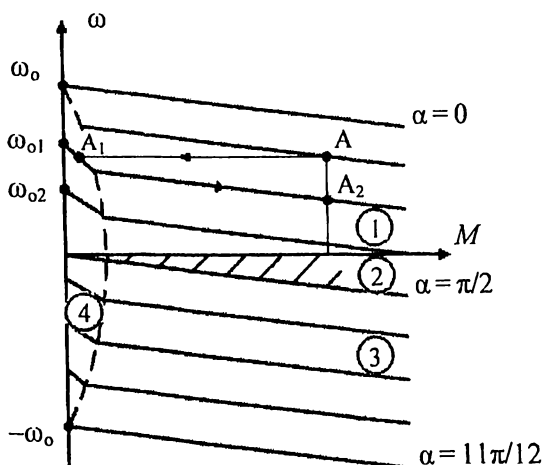


Рис. 5.6. Механические характеристики нереверсивного привода ТП-Д

Область 1 – двигательный режим, в котором машина постоянного тока работает двигателем, а ТП работает выпрямителем. С ростом угла α характеристика смещается вниз за счет изменения скорости холостого хода двигателя ω_{oi} , которая определяется по выражению

$$\omega_{oi} = \frac{E_{d0} \cos \alpha}{k\Phi}. \quad (5.5)$$

Область 2 – режим протягивающего груза для двигателя при работе ТП выпрямителем. Характеристика при угле управления $\alpha = \pi/2$ соответствует режиму динамического торможения привода.

Область 3 – режим рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть. Для двигателя – это режим протягивающего груза, для преобразователя – инверторный режим.

Область 4 – зона прерывистых токов, которая проявляется при малых токах в якорной цепи. Выпрямленный ток в ТП имеет непрерывный характер, если индуктивность в цепи выпрямления стремится к бесконечности. При конечных значениях индуктивности якорной цепи L_a условие непрерывности тока может нарушаться, возникает режим прерывистых токов. Влияние режима прерывистых токов проявляется в увеличении среднего значения выпрямленного напряжения ТП, при этом характеристики «загибаются» вверх. Для уменьшения зоны прерывистых токов последовательно с якорем двигателя включают сглаживающий дроссель.

5.2.4. Механические характеристики реверсивного привода по системе ТП–Д

В нереверсивных приводах возможно реверсирование двигателя. Оно может быть осуществлено путем изменения направления тока возбуждения двигателя или с помощью электромеханических контакторов вперед–назад.

Схема реверсивного привода содержит реверсивный преобразователь, который содержит две группы вентилях, включенных между собой встречно параллельно. Одна группа вентилях предназначена для обеспечения движения привода в прямом направлении (В – вперед), а другая – в обратном (Н – назад). Управление вентилями в таком преобразователе осуществляется раздельно, импульсы подаются только на ту группу вентилях, которая работает в данный момент. Такое управление осуществляется с помощью специального логического устройства. Для согласования механических характеристик в двигательном и тормозном режимах применяется согласованный принцип раз-

дельного управления, при котором выполняется условие $\alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{н}} = \pi$.

Механические характеристики реверсивного привода расположены во всех четырех квадрантах поля ω – M и представлены на рис. 5.7.

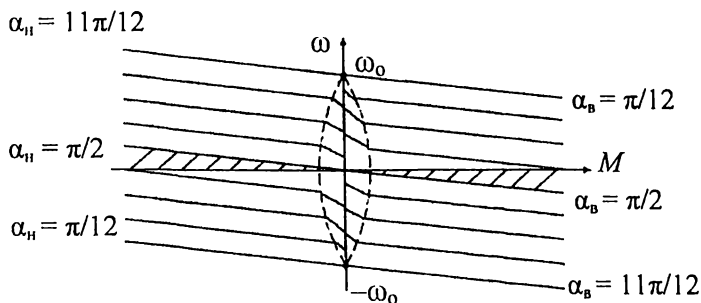


Рис. 5.7. Механические характеристики реверсивного привода ТП–Д

Основные свойства реверсивного привода по системе ТП–Д:

- большой диапазон регулирования скорости ($D = 10 \dots 1$) в разомкнутых приводах, в замкнутых много больше;
- регулирование плавное;
- высокая жесткость характеристик;
- возможность получения двухзонного регулирования скорости: вверх за счет ослабления магнитного потока;
- высокий КПД привода как системы, так как КПД трансформатора достаточно высок (0,93–0,98), а КПД выпрямителя – 0,8–0,92.

Недостатки реверсивного привода по системе ТП–Д:

- ТП имеет одностороннюю проводимость, поэтому для получения характеристик во всех четырех квадрантах необходимо применять реверсивную схему с двумя группами вентилей, что приводит к большим затратам;
- напряжение и ток преобразователя имеют пульсирующий характер, что ухудшает режим работы двигателя, поэтому в таких приводах применяют сглаживающие реакторы или специальные многофазные схемы выпрямителей;

– механические характеристики имеют зону прерывистых токов, где жесткость падает, характеристики становятся нелинейными;

– с ростом диапазона регулирования скорости снижается коэффициент мощности привода, так как $\cos \varphi_1 \approx \cos \alpha$;

– ТП вносит искажения в форму тока и напряжения питающей сети, что неблагоприятно сказывается на работе смежных потребителей.

Несмотря на указанные недостатки, привод по системе ТП–Д является основным видом регулируемого привода постоянного тока.

5.3. Электропривод с широтно-импульсным регулированием

В электроприводе с широтно-импульсным регулированием (ШИР) применяются силовые транзисторы JGBT с изолированным затвором напряжением до 1500 В и током до 500 А. Частота переключения транзисторов составляет 2–10 кГц.

Схема *неверсивного* привода с ШИР приведена на рис. 5.8. Якорная цепь двигателя подключается к выпрямителю В с помощью силового транзистора Т. Частота коммутации транзистора определяется выражением

$$\omega_k = \frac{1}{T_k}, \quad (5.6)$$

где T_k – период импульсов, $T_k = t_b + t_o$; t_b и t_o – время включенного и отключенного состояния транзистора.

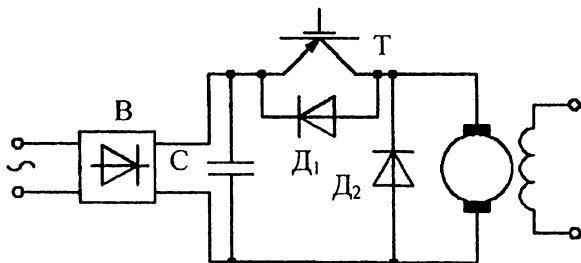


Рис. 5.8. Схема электропривода постоянного тока
с ШИР

Принцип широтно-импульсного регулирования напряжения поясняет рис. 5.9. Среднее значение регулируемого напряжения

$$U_{\text{ср}} = \gamma U_{\text{п}}, \quad (5.7)$$

где γ – скважность импульсов, $\gamma = \frac{t_{\text{в}}}{T_{\text{к}}}$

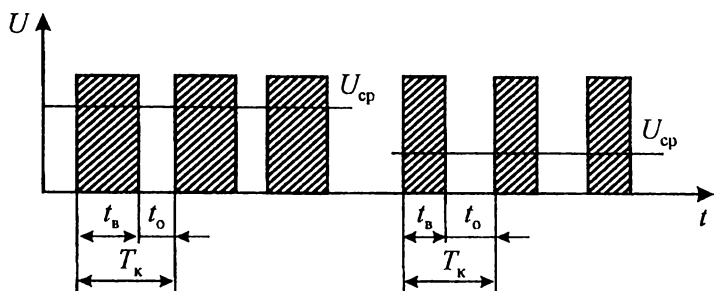


Рис. 5.9. Принцип широтно-импульсного регулирования напряжения

Если время включенного состояния велико и составляет $t_{\text{в}} = 0,95T_{\text{к}}$, то среднее значение напряжения считают максимальным:

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{max}} = 0,95U_{\text{п}}, \quad (5.8)$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение выпрямителя.

Если $t_{\text{в}}$ меньше, то среднее значение напряжения уменьшается в соответствии с формулой. Таким образом, на двигатель подается регулируемое напряжение.

Величина $U_{\text{п}}$ зависит от схемы выпрямителя и при значительной емкости C фильтра может приближаться к линейному напряжению, подаваемому на выпрямитель.

Ток, протекающий в якоре, из-за значительной индуктивности в якорной цепи является непрерывным, но имеет некоторые пульсации (рис. 5.10).

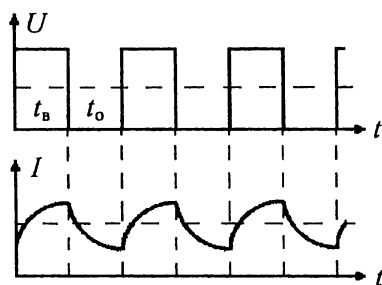


Рис. 5.10. Диаграммы напряжения и тока двигателя при ШИР

Во время отключенного состояния ток в якорной цепи протекает за счет ЭДС самоиндукции якоря и диода D_2 . Амплитуда пульсаций тока якоря зависит от частоты коммутации и тем меньше, чем выше частота ω_k . Частота коммутации составляет 2–10 кГц, поэтому амплитуда пульсаций тока в электроприводах с ШИР значительно меньше, чем в электроприводах ТП–Д с управлением от СИФУ

Механическая характеристика привода с ШИР может быть записана в виде

$$\omega = \frac{\gamma U_n}{k\Phi} - \frac{RM}{(k\Phi)^2}, \quad (5.9)$$

где скважность импульсов $\gamma = 0 \dots 0,95$.

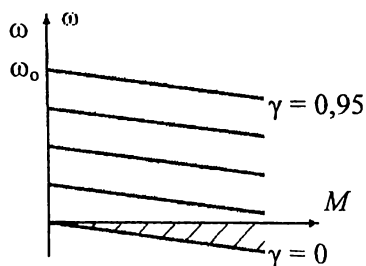


Рис. 5.11. Механические характеристики ТП–Д с ШИР

Механические характеристики нереверсивного привода с ШИР (рис. 5.11) подобны механическим характеристикам нереверсивного привода ТП–Д. При уменьшении подводимого к двигателю напряжения характеристики параллельно смещаются вниз от естественной характеристики, сохраняя свою жесткость.

Достоинство привода с ШИР – высокий коэффициент мощности, так как для неуправляемого выпрямителя $\cos \varphi$ по первой гармонике близок к единице.

В реверсивных приводах с ШИР используется мостовая схема включения силовых транзисторов (рис. 5.12).

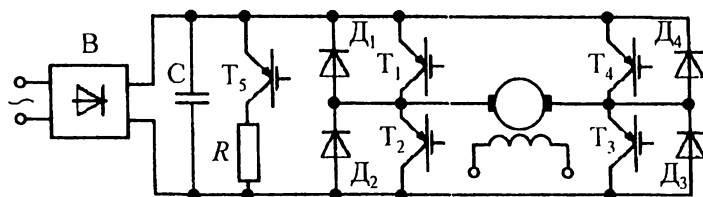


Рис. 5.12. Схема реверсивного электропривода ТП-Д с ШИР

Для протекания тока в одном направлении используются транзисторы T_1, T_3 , а для протекания в обратном направлении – транзисторы T_2, T_4 . Для обеспечения непрерывности тока используются диоды D_1 – D_4 . Широтно-импульсное регулирование напряжения в реверсивных схемах может осуществляться двумя способами:

- аналогично нереверсивной схеме;
- применением двухполярной коммутации за время каждого периода заданной частоты.

Принцип регулирования напряжения в реверсивных приводах с ШИР при двухполярной коммутации показан на рис. 5.13.

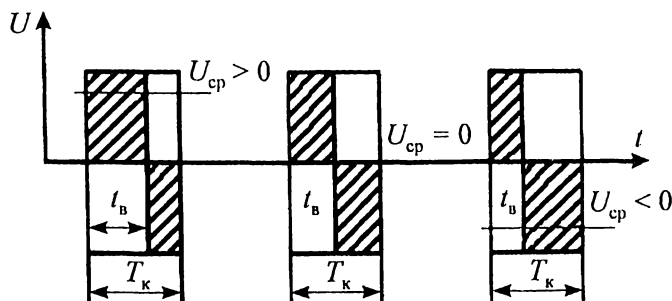


Рис. 5.13. Эпюры напряжений при ШИР с двухполярной коммутацией

В течение времени t_b включаются транзисторы T_1, T_3 , а в течение времени $(T_k - t_b)$ – транзисторы T_2, T_4 . Величина среднего напряжения U_{cp} определяется по выражению

$$U_{cp} = U_{п}(2\gamma - 1). \quad (5.10)$$

В зависимости от соотношения длительности времени T_k и t_b меняется знак среднего напряжения U_{cp} , подаваемого на двигатель: при $t_b > 0,5 T_k$ напряжение $U_{cp} > 0$; при $t_b = 0,5 T_k$ напряжение $U_{cp} = 0$; а при $t_b < 0,5 T_k$ напряжение $U_{cp} < 0$.

Механические характеристики реверсивного электропривода ТП–Д с ШИР приведены на рис. 5.14. Искусственные характеристики параллельны естественной характеристике, не меняют жесткость и располагаются в I и III квадрантах поля ω – M .

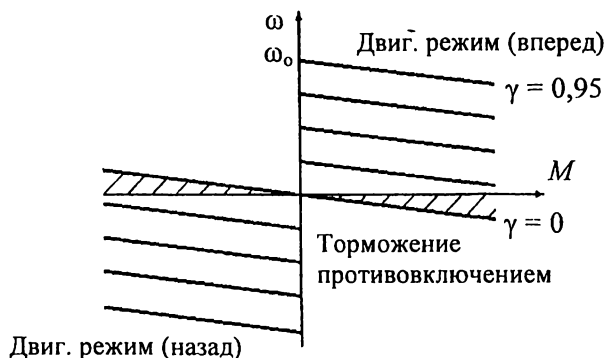


Рис. 5.14. Механические характеристики реверсивного электропривода ТП–Д с ШИР

В реверсивных электроприводах постоянного тока с ШИР ввиду односторонней проводимости выпрямителя режим рекуперативного торможения также невозможен.

Динамическое торможение осуществляется при скважности $\gamma = 0$ и среднем напряжении $U_{cp} = 0$ через транзистор T_5 и резистор R . Характеристика при динамическом торможении проходит через начало координат.

Торможение противовключением используется в приводах небольшой мощности с ограничением тока якоря. Этому виду торможения соответствует заштрихованная область во II и IV квадрантах поля ω – M .

Глава 6

ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный электропривод является самым массовым повсеместно применяемым видом привода. Это объясняется тем, что асинхронные двигатели (АД) просты в изготовлении и эксплуатации, имеют высокие технико-экономические показатели и надежны в работе. Отечественной промышленностью АД выпускаются в виде серий разных модификаций и конструктивного исполнения: общепромышленная серия 4А мощностью 0,06–400 кВт; серии 5А, 6А и 7А с повышенным содержанием стали и меди; серия АН–2 мощностью до 2000 кВт; серия АВ мощностью до 8000 кВт; серия ДАЗ0 мощностью до 1250 кВт. Для крановых механизмов выпускаются АД серии МТФ с фазным ротором и МТКФ с короткозамкнутым ротором. Двигатели серии АИ мощностью от 0,75 до 160 кВт имеют унифицированные по международным стандартам параметры. АД серии В и ВР предназначены для работы во взрывоопасных и пожароопасных средах.

Основной областью применения АД до недавнего времени был нерегулируемый электропривод. В настоящее время в связи с разработкой и внедрением тиристорных преобразователей напряжения и частоты все большее применение находит регулируемый асинхронный привод, не уступающий по качеству регулирования электроприводу постоянного тока.

6.1. Электромеханические и механические характеристики АД

Схемы включения трехфазного АД приведены на рис. 6.1. Статор АД подключается к сети трехфазного переменного тока. В зависимости от конструктивного исполнения ротора различают АД с фазным и короткозамкнутым ротором. Конструкция фазного ротора позволяет включать в его цепь различные элементы, например, резисторы, с помощью которых можно регулировать скорость вращения двигателя, ограничивать пусковые токи и моменты.

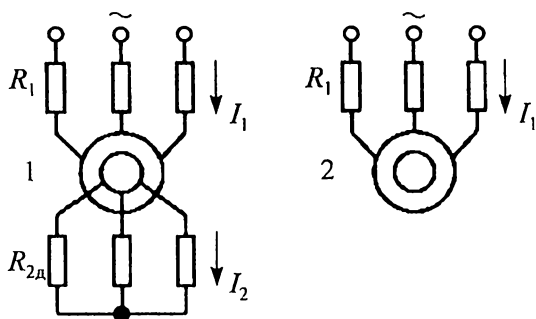


Рис. 6.1. Схемы включения асинхронного двигателя: 1 – с фазным ротором; 2 – с короткозамкнутым ротором

Для получения выражений электромеханической и механической характеристик АД используется Г-образная схема замещения с вынесенным намагничивающим контуром (рис. 6.2).

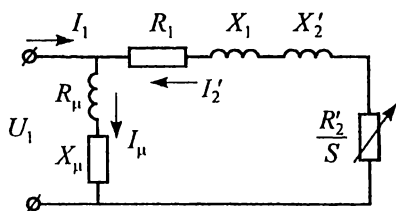


Рис. 6.2. Схема замещения асинхронного двигателя

В этой схеме приняты следующие обозначения: $R_1 = R_c + R_{1д}$ – активные сопротивления обмотки статора, добавочного резистора и суммарное сопротивление фазы статора; $R'_2 = R'_p + R'_{2д}$ – активные приведенные к статору сопротивления обмотки ротора, добавочного резистора и суммарное сопротивление фазы ротора;

R_μ, X_μ – сопротивления намагничивающего контура; s – скольжение; $\dot{I}_\mu = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$ – токи намагничивающего контура, статора и приведенный ток ротора; U_1 – фазное напряжение сети.

Электромеханическая характеристика АД представляет зависимость тока ротора от скольжения и непосредственно получается из схемы замещения

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_\kappa^2}}, \quad (6.1)$$

где X_k – индуктивное сопротивление короткого замыкания, $X_k = X_1 + X'_2$.

Если характеристику представить как зависимость от угловой скорости ω , то такой переход можно осуществить с помощью выражения $\omega = \omega_0(1-s)$. Электромеханическая характеристика АД приведена на рис. 6.3.

Характерные точки этой зависимости получим при изменении величины скольжения s в пределах $\pm\infty$:

$s = 0, \omega = \omega_0, I'_2 = 0$ – точка идеального холостого хода;

$s = 1, \omega = 0, I'_2 = I_{2к.з} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + X_k^2}}$ – точка короткого

замыкания;

$s_1 = -\frac{R'_2}{R_1}, \omega = \omega_0(1+s), I'_2 = I_{\max} = \frac{U_1}{X_k}$ – точка максималь-

ного значения тока ротора, лежащая в области отрицательных скольжений;

$I'_2 = I_{2\infty} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}$ – асимптотическое значение тока ро-

тора при $s \rightarrow \pm\infty$.

Механическая характеристика АД – это зависимость момента от скольжения. Ее получают из потерь в роторе, которые определяют как разность электромагнитной и механической мощностей двигателя:

$$\Delta P_2 = P_3 - P_2 = M(\omega_0 - \omega).$$

Откуда электромагнитный момент АД

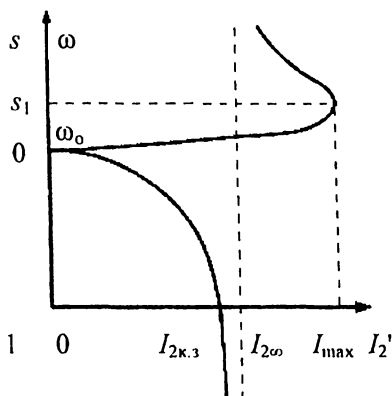


Рис. 6.3. Электромеханическая характеристика АД

$$M = \frac{\Delta P_2}{\omega_o s} = \frac{3I_2'^2 R_2'}{\omega_o s} \quad (6.2)$$

Подставив в это выражение значение тока ротора из схемы замещения, получим

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_o s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_k^2 \right]}. \quad (6.3)$$

Если исследовать эту зависимость на экстремум $\frac{dM}{ds} = 0$, то получим две экстремальные точки момента и скольжения:

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_o \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}; \quad (6.4)$$

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}, \quad (6.5)$$

знак плюс соответствует двигательному режиму, а знак минус – генераторному режиму.

Механическая характеристика АД показана на рис. 6.4. Характерные точки этой характеристики:

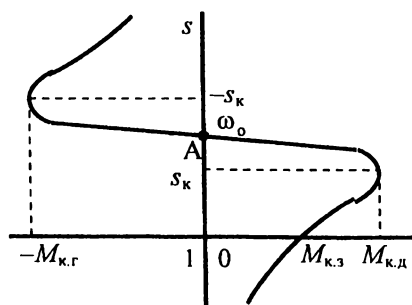


Рис. 6.4. Механическая характеристика АД

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

$s = 1, \omega = 0, M = M_{k.з}$ – точка короткого замыкания, характеризует режим пуска;

$s = s_k, M = M_{k.д}$ – точка экстремума в режиме работы двигателя;

$s = -s_k, M = M_{k.г}$ – точка экстремума в режиме работы генератора;

$M = 0$ – асимптотическое значение момента при $s \rightarrow \pm\infty$.

6.2. Упрощенные выражения механической характеристики

Часто пренебрегают величиной активного сопротивления в цепи статора R_1 , тогда получают упрощенные формулы механической характеристики АД. Одной из них является формула Клосса

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{s/s_{\kappa} + s_{\kappa}/s}, \quad (6.6)$$

где M_{κ} – критический момент $M_{\kappa} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_{\kappa}}$; s_{κ} – критическое скольжение, $s_{\kappa} = \frac{R'_2}{X_{\kappa}}$.

Значения M_{κ} и s_{κ} можно рассчитать по паспортным данным двигателя, к которым относятся номинальная мощность P_n , номинальная скорость вращения n_n и перегрузочная способность $\lambda = M_{\kappa} / M_n$.

Расчет ведется в следующей последовательности:

– номинальный момент $M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$, где $\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}$;

– номинальное скольжение $s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}$, где ω_0 – синхрон-

ная угловая скорость;

– критический момент $M_{\kappa} = \lambda M_n$;

– критическое скольжение $s_{\kappa} = s_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right)$.

Изменяя величину скольжения в диапазоне $s = 0 \dots 1$ с шагом, например, $\Delta s = 0,1$, можно построить механическую характеристику АД.

При малых скольжениях в формуле Клосса можно пренебречь величиной s/s_{κ} , тогда момент АД пропорционален скольжению:

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{s_{\kappa}} s. \quad (6.7)$$

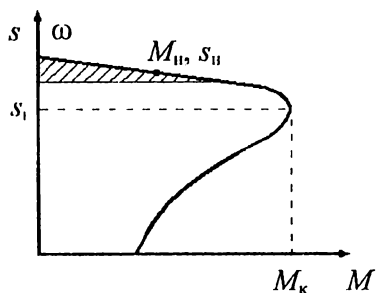


Рис. 6.5. Упрощенная механическая характеристика АД на рабочем участке

Этим выражением можно описать рабочий участок характеристики, который включает в себя точку номинального режима (рис. 6.5).

АД может работать во всех квадрантах поля ω – M . Режимы работы АД определяются величиной и знаком скольжения.

Двигательный режим является основным режимом работы АД, характеризуется изменением скольжения в диапазоне $0 < s < 1$. Характерные точки этого режима:

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

$s = 1, \omega = 0, M = M_{к.з}$ – точка короткого замыкания, характеризует режим пуска.

Генераторный рекуперативный режим с отдачей энергии в сеть, при котором скольжение $s < 0$, а угловая скорость ротора $\omega > \omega_0$.

Режим торможения противовключением, при котором магнитное поле статора вращается в одном направлении, а ротор вращается в другом.

Режим динамического торможения, при котором обмотка статора АД отключается от сети переменного тока и подключается к источнику постоянного тока, а обмотка ротора замыкается накоротко или на добавочное сопротивление.

6.3. Регулирование координат АД с помощью резисторов

Этот способ регулирования называется *реостатным* и осуществляется путем введения добавочных резисторов в цепь статора или в цепь ротора.

Включение добавочных резисторов в цепь статора применяется в основном для АД с короткозамкнутым ротором.

На рис. 6.6 представлены характеристики АД при разных добавочных резисторах, включенных в цепь статора. Все харак-

теристики выходят из одной точки, так как величина ω_0 не зависит от добавочного сопротивления R_d . Увеличение величины R_d приводит, как это следует из формулы, к снижению токов и моментов двигателя, в том числе и пусковых, поэтому искусственные характеристики располагаются ниже естественных характеристик. Критический момент M_k и критическое скольжение s_k с ростом R_d уменьшаются.

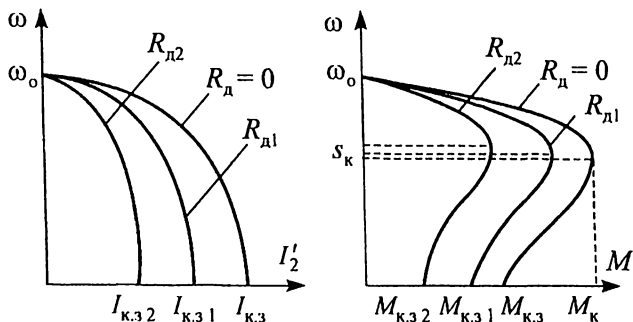


Рис. 6.6. Характеристики АД при изменении сопротивления R_d в цепи статора ($R_{d2} > R_{d1}$)

Для регулирования скорости этот способ малопригоден, так как обеспечивает очень малый диапазон регулирования. Жесткость характеристик и перегрузочная способность с ростом добавочного сопротивления уменьшаются, при этом возрастают потери в цепи статора. Данный способ регулирования координат применяется в основном для ограничения тока и момента АД в переходных режимах: при пуске, реверсе, торможении. Применяется этот способ редко, например в маломощных электроприводах лифтов.

Включение добавочных резисторов в цепь ротора применяется как с целью ограничения тока и момента двигателя, так и с целью регулирования скорости. Характеристики АД при данном способе регулирования показаны на рис. 6.7.

Все характеристики выходят из одной точки, так как величина ω_0 и в этом случае не зависит от добавочного сопротивления R'_d , искусственные характеристики располагаются ниже естественных характеристик. Увеличение R'_d приводит к возраста-

нию критического скольжения s_k , а критический момент M_k остается без изменения, т.е. перегрузочная способность АД сохраняется. Одновременно с этим уменьшается пусковой ток $I_{к.з}$, а пусковой момент $M_{к.з}$ увеличивается. Пусковой момент при некотором значении сопротивления R'_d достигает величины M_k , а затем при дальнейшем увеличении сопротивления уменьшается.

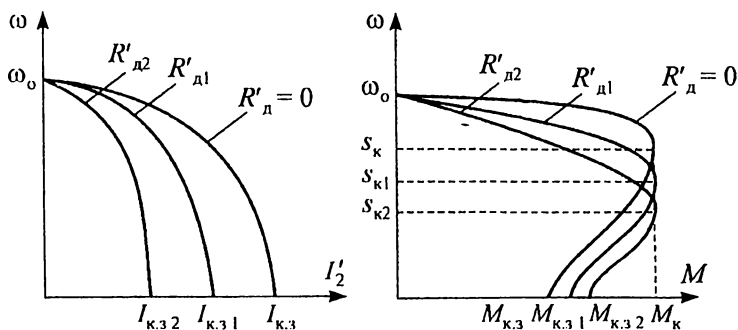


Рис. 6.7. Характеристики АД при изменении сопротивления R'_d в цепи ротора ($R'_{d2} > R'_{d1}$)

Показатели качества при реостатном регулировании скорости:

- небольшой диапазон регулирования, $D = 2 \dots 3$;
- регулирование скорости однозонное в сторону ее уменьшения;
- регулирование ступенчатое, так как сопротивление R'_d в цепь ротора вводится ступенями;
- жесткость характеристик и стабильность скорости снижаются;
- дополнительные потери мощности в R'_d приводят к снижению КПД.

Несмотря на не очень хорошие показатели, реостатное регулирование скорости находит достаточно широкое применение в электроприводах подъемно-транспортных устройств, при небольшом диапазоне регулирования или кратковременной работе при пониженных скоростях.

6.4. Расчет добавочных резисторов в цепи ротора

Расчет добавочных резисторов проводится для того, чтобы получить заданную искусственную характеристику или чтобы искусственная характеристика прошла через точки с координатами ω_n , M_n . Для расчета резисторов используют разные методы.

В методе пропорций для определения добавочного сопротивления необходимо знать сопротивление фазы обмотки ротора. Расчет сопротивлений методом пропорций поясняет рис. 6.8. Предполагается, что известна естественная механическая характеристика и определена ее точка с координатами M_K и s_K .

Метод основывается на отношении критических скольжений на естественной и искусственной характеристиках:

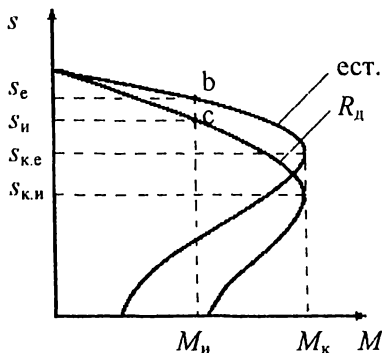


Рис. 6.8. К определению добавочных сопротивлений в роторе методом пропорций

$$\frac{s_{\kappa.e}}{s_{\kappa.и}} = \frac{R'_p}{(R'_p + R'_d)} = \frac{R_p}{R_p + R_d}, \quad (6.8)$$

где R_p – сопротивление фазы обмотки ротора АД. Откуда по-
лучаем

$$R_n = R_p \left(\frac{s_{k,n}}{s_{k,e}} - 1 \right). \quad (6.9)$$

Эта формула справедлива не только для критического момента M_k , но и для любого момента M_n . Поэтому величина добавочного резистора в цепи ротора может быть определена и по выражению

$$R_d = R_p \left(\frac{s_n}{s_p} - 1 \right), \quad (6.10)$$

где s_n и s_c – скольжения на механических характеристиках АД при моменте M_n .

Если отсутствуют данные по сопротивлению фазы ротора R_p , то оно может быть найдено приближенно по формуле

$$R_p = \frac{E_{2к} s_n}{\sqrt{3} I_{2н}}, \quad (6.11)$$

где $E_{2к}$, s_n , $I_{2н}$ – паспортные данные двигателя; $E_{2к}$ – ЭДС неподвижного ротора.

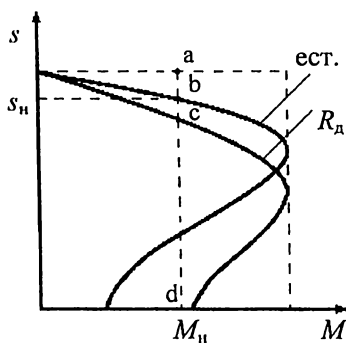


Рис. 6.9. К определению добавочных сопротивлений в роторе методом отрезков

В методе отрезков не требуется знать величину сопротивления ротора R_p , более того, оно может быть определено этим методом. Расчет сопротивлений методом отрезков поясняет рис. 6.9, на котором представлены естественная и искусственная механические характеристики АД. К оси моментов в точке M_n проведена вертикальная линия, и на ней отмечены характерные точки a, b, c, d, образующие между собой некоторые отрезки. Сопротивление добавочного резистора для получения искусственной характеристики определяется через эти отрезки по выражению

$$R_d = R_{ном} \frac{bc}{ad}, \quad (6.12)$$

где $R_{ном}$ – номинальное сопротивление АД, $R_{ном} = \frac{E_{2к}}{\sqrt{3} I_{2н}}$.

Для определения сопротивления фазы ротора R_p используется естественная механическая характеристика и соответствующий ей отрезок ab:

$$R_p = R_{ном} \frac{ab}{ad}. \quad (6.13)$$

Расчет пусковой диаграммы является типовой задачей расчета резисторов, обеспечивающих реостатный пуск АД (рис. 6.10). Предполагается, что рабочие участки механических характеристик при пуске близки к линейным. Пусковые моменты M_1 и моменты переключения M_2 обычно выбираются в пределах: $M_1 = (0,8 \dots 0,9)M_k$, $M_2 = (1,1 \dots 1,2)M_c$.

Число ступеней m пускового реостата, включая естественную характеристику,

$$m = \frac{\lg\left(\frac{1}{s_n M_1^*}\right)}{\lg\left(\frac{M_1^*}{M_2^*}\right)} = \frac{\lg s_e}{\lg s_2}, \quad (6.14)$$

где s_n — номинальное скольжение; моменты M_1^* и M_2^* выражены в долях номинального момента M_n ; $s_e = s_4$ — скольжение на естественной характеристике при M_1 ; s_2 — скольжение на нижней искусственной характеристике при полностью введенном пусковом реостате и моменте переключения M_2 .

Сопротивления ступеней реостата можно рассчитать по методу отрезков.

6.5. Регулирование координат электропривода с АД изменением напряжения

Для регулирования координат электропривода данным способом необходимы источники, позволяющие изменять величину подводимого к двигателю напряжения. В качестве регуляторов напряжения могут быть использованы автотрансформаторы, магнитные усилители, тиристорные регуляторы напряжения

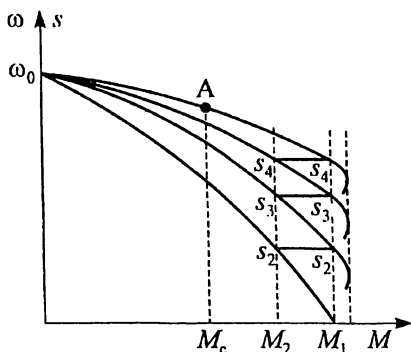


Рис. 6.10. Пусковая диаграмма АД с фазным ротором

(ТРН) и др. В настоящее время наибольшее применение среди регуляторов напряжения находят ТРН с импульсно-фазовой системой управления.

Схема питания АД от ТРН приведена на рис. 6.11. Напряжение сети подается на ТРН, а с него на двигатель. Выходное напряжение ТРН регулируется сигналом управления U_y .

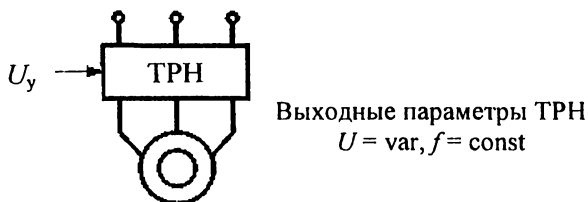


Рис. 6.11. Схема питания АД от тиристорного регулятора напряжения ТРН

На рис. 6.12 показана одна из схем ТРН со встречно-параллельным включением тиристоров. В этой схеме в каждую фазу статорной обмотки АД включаются два тиристора, чтобы обеспечить протекание тока в фазе в оба полупериода питающего напряжения.

Принцип регулирования переменного напряжения с помощью пары тиристоров со встречно-параллельным включением поясняет рис. 6.13.

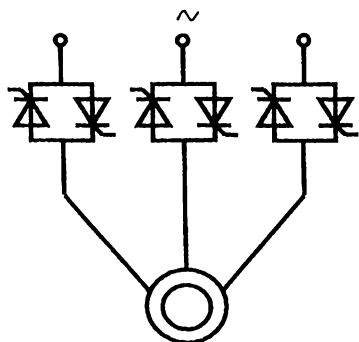


Рис. 6.12. Схема ТРН со встречно-параллельным включением тиристоров

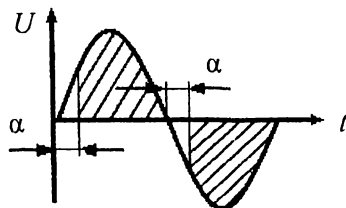


Рис. 6.13. К вопросу регулирования напряжения с помощью тиристора

Тиристоры открываются в тот момент, когда на них подается сигнал управления. Момент подачи сигнала управления характеризуется углом α , который называют углом управления тиристора. При подаче импульсов с углом управления $\alpha = 0$ тиристоры открыты в течение всего времени проводящего полупериода подводимого напряжения, поэтому к нагрузке прилагается все напряжение сети. Если управляющие импульсы подавать с задержкой на угол α , то тиристоры будут открыты только часть полупериода, и к нагрузке будет приложено меньшее напряжение. Изменяя угол управления от $\alpha = 0$ до $\alpha = \pi$, можно регулировать напряжение на нагрузке от полного напряжения сети до нуля.

Иногда вместо пары со встречно-параллельным включением тиристоров используется семистор, обеспечивающий протекание тока в обоих направлениях.

Электромеханические и механические характеристики АД при изменении подводимого напряжения приведены на рис. 6.14. Напряжение U регулятора, подаваемое на двигатель, не влияет на его скорость холостого хода ω_0 , поэтому характеристики АД выходят из одной точки. При снижении напряжения уменьшаются величины тока и момента двигателя, в том числе и их пусковые значения. Критическое скольжение s_k остается без изменений, а критический момент M_k падает. Отметим, что уменьшение напряжения приводит к большему снижению момента, чем тока. Объясняется это тем, что величина момента АД пропорциональна U^2 .

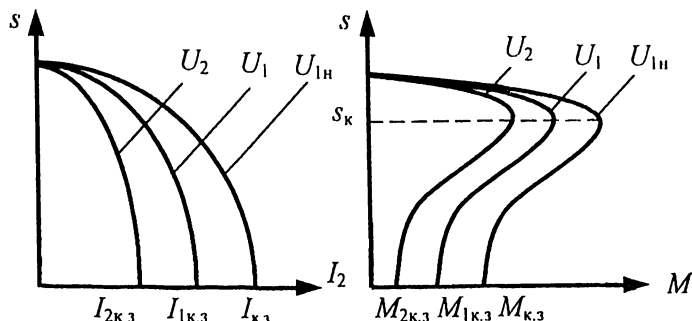


Рис. 6.14. Характеристики АД при изменении подводимого напряжения ($U_{1n} > U_1 > U_2$)

Механические характеристики малопригодны для регулирования скорости, так как мал диапазон регулирования, и при снижении напряжения значительно уменьшается перегрузочная способность двигателя λ . Поэтому разомкнутая схема электропривода с ТРН используется лишь для воздействия в переходных режимах на ток и момент двигателя.

Для реверса двигателя используется 5 пар со встречно-параллельным включением тиристоров. Реверсивная схема включения АД при питании от ТРН приведена на рис. 6.15. Для

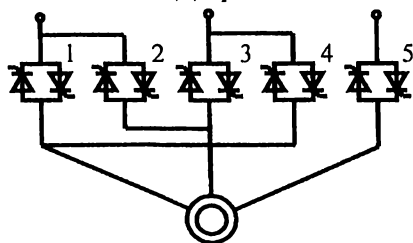


Рис. 6.15. Реверсивная схема АД при питании от ТРН

вращения в одном направлении работают 3 пары тиристоров, например 1, 3 и 5, а для вращения в другом направлении вместо пар 1 и 3 используются новые пары – 4 и 2.

Существенный недостаток ТРН – это несинусоидальность формы выходного

напряжения. Регуляторы ТРН имеют большие возможности. Они могут обеспечить плавный пуск двигателя, принудительное электрическое торможение, формирование требуемых динамических характеристик в переходных режимах и экономичные режимы работы АД при работе с переменной нагрузкой.

6.6. Частотное регулирование скорости АД

При частотном регулировании скорости изменяется частота f_1 подводимого к АД напряжения, что позволяет изменять его скорость холостого хода $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ и получать различные искусственные характеристики. Для обеспечения высоких энергетических показателей АД одновременно с частотой необходимо изменять величину напряжения U_1 . Рациональный закон изменения U_1 и f_1 зависят от характера изменения статического момента на валу – M_c .

При постоянном моменте на валу, т.е. при $M_c = \text{const}$, напряжение и частота должны изменяться по закону $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$;

при вентиляторном моменте сопротивления – по закону $\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$; а при моменте M_c , обратно пропорциональном частоте вращения, по закону $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$.

Частотный способ регулирования скорости реализуется в специальных преобразователях энергии, получивших название преобразователей частоты (ПЧ). На вход ПЧ подается неизменное стандартное напряжение промышленной частоты, а выходные напряжение и частота ПЧ регулируются в соответствии с рассмотренными выше законами. Закон изменения выходных параметров ПЧ формируется с помощью устройства управления, на которое подается сигнал управления.

Различные виды ПЧ, применяемые в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах, можно разделить на электромашинные и статические ПЧ.

В электромашинных ПЧ используется ряд электрических машин (от 2 до 4), каждая мощностью, не меньшей мощности АД. Эти ПЧ громоздки по размерам, дорогостоящи, имеют низкий общий КПД, переходные процессы в них характеризуются значительной инерционностью.

В статических ПЧ используются тиристоры или силовые транзисторы. Они имеют более высокие технико-экономические показатели по сравнению с электромашинными ПЧ: высокий КПД и значительное быстродействие переходных процессов, низкие массогабаритные показатели, отсутствие шума.

Статические ПЧ реализуются по двум схемам: *ПЧ с непосредственной связью* и *ПЧ со звеном постоянного тока*.

Блок-схема ПЧ с непосредственной связью (рис. 6.16) состоит из силового блока 1 и блока управления 2. Силовой блок выполняется на базе тиристоров или силовых транзисторов, управляемых сигналами с блока 2. Трехфазное напряжение U_1 стандартной частоты f_1 подается на блок 1, в котором под действием сигналов с блока 2 преобразуется в трехфазное переменное напряжение U с регулируемой частотой f . Отметим, что выходная частота f ПЧ может изменяться только в сторону ее уменьшения по сравнению с частотой сети.

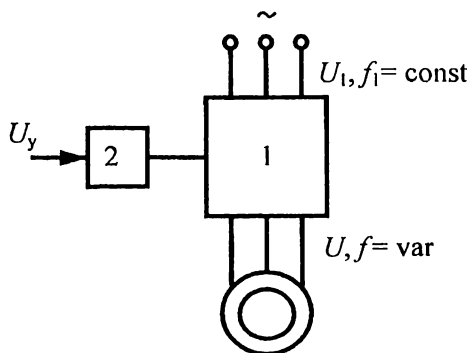


Рис. 6.16. Схема питания АД от преобразователя частоты с непосредственной связью: 1 – силовой блок; 2 – блок управления

Блок-схема ПЧ со звеном постоянного тока (рис. 6.17) состоит из управляемого выпрямителя УВ и инвертора И с блоками управления БУ_в и БУ_и. Трехфазное напряжение U_1 стандартной частоты f_1 подается на управляемый выпрямитель, который преобразует его в постоянное напряжение U_0 . Величину U_0 можно регулировать в значительных пределах с помощью устройства БУ_в. Постоянное напряжение подается на инвертор, который преобразует его в трехфазное напряжение U с регулируемой частотой f . Частота f выходного напряжения регулируется

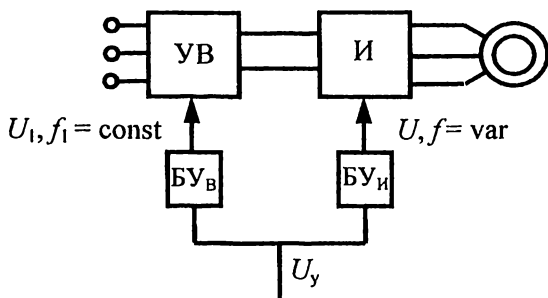


Рис. 6.17. Схема питания АД от преобразователя частоты со звеном постоянного тока: УВ – управляемый выпрямитель; И – инвертор; БУ_в, БУ_и – блоки управления выпрямителя и инвертора

устройством управления БУ_н. Отметим, что в этом ПЧ можно получать частоту как ниже, так и выше стандартной частоты сети.

Механические характеристики частотно-регулируемого АД при его управлении по наиболее распространенному закону регулирования $U_1/f_1 = \text{const}$ приведены на рис. 6.18. Они разделяются на характеристики, располагаемые ниже естественной при номинальной частоте $f_{1н}$ и выше ее.

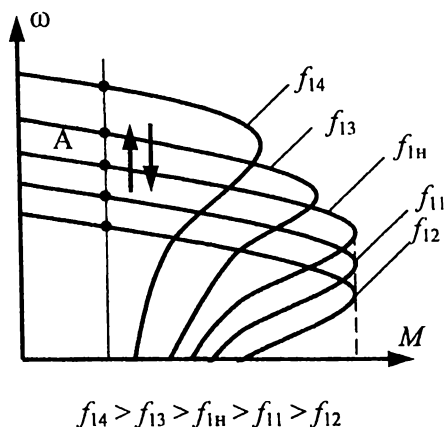


Рис. 6.18. Механические характеристики АД при частотном регулировании

При частоте $f_1 < f_{1н}$ напряжение, подводимое к АД, уменьшается, поэтому критический момент M_k и перегрузочная способность λ двигателя остаются неизменными. Это следует из анализа упрощенной формулы

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 x_k}, \quad (6.15)$$

где принимая во внимание $\omega_0 \sim f_1$ и $x_k \sim f_1$, получим

$$M_k \sim \frac{U_1^2}{f_1^2} = \frac{U_1}{f_1} = \text{const.}$$

Регулирование в этом диапазоне частот осуществляется при номинальном допустимом моменте.

При частоте $f_1 > f_{1н}$ регулирование скорости АД ведется при номинальном напряжении, так как по условиям его нормальной работы повышать напряжение выше $U_{1н}$ нельзя. Поэтому критический момент M_k и перегрузочная способность λ двигателя уменьшаются. Регулирование в этом диапазоне частот осуществляется при номинальной допустимой мощности.

Показатели качества при частотном регулировании скорости:

- большой диапазон регулирования: в разомкнутых системах $D = 5 \dots 10$, в замкнутых схемах электроприводов $D > 1000$;

- регулирование плавное ввиду плавного изменения частоты f_1 ;

- регулирование двухзонное: при уменьшении скорости осуществляется при постоянном моменте с сохранением перегрузочной способности λ , при увеличении скорости регулирование осуществляется при постоянной мощности;

- жесткость характеристик и их стабильность не меняются;

- регулирование экономическое, так как отсутствуют добавочные потери в цепи ротора.

Недостаток частотного регулирования состоит в больших затратах на ПЧ, которые сопоставимы со стоимостью самого двигателя. Несмотря на указанный недостаток, в настоящее время это основной тип регулируемого электропривода с АД.

6.7. Регулирование скорости изменением числа пар полюсов

Этот способ применяется для короткозамкнутых АД, получивших названия многоскоростных. Обмотка статора таких двигателей выполняется в виде полуобмоток, которые могут при переключении соединяться между собой последовательно или параллельно. При этом изменяется число пар полюсов в машине. Чаще всего применяются двухскоростные АД, у которых число пар полюсов меняется в отношении 1:2. Выпускаются также трехскоростные АД и реже четырехскоростные АД.

Основными схемами преобразования соединений полуобмоток статора двухскоростного АД являются переключения со «звезды» на «двойную звезду» и с «треугольника» на «двойную звезду» (рис. 6.19).

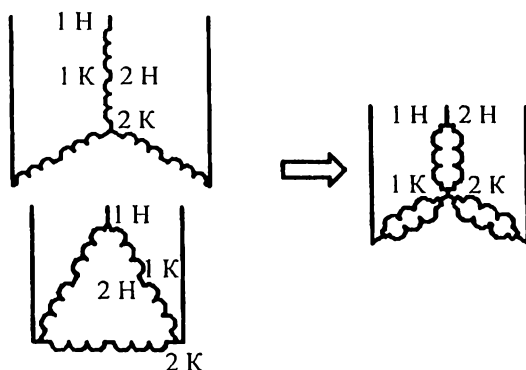


Рис. 6.19. Схемы преобразования соединений «звезда» и «треугольник» в «двойную звезду»

Механические характеристики двухскоростного АД при регулировании скорости изменением числа пар полюсов p отличаются хорошей жесткостью и достаточной перегрузочной способностью (рис. 6.20). Регулирование скорости в схеме преобразования «звезда» – «двойная звезда» осуществляется при постоянном допустимом моменте $M = \text{const}$, а в схеме «треугольник» – «двойная звезда» – при постоянной допустимой мощности $P = \text{const}$.

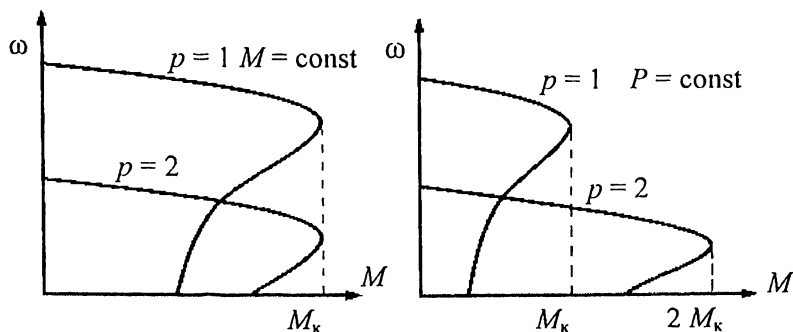


Рис. 6.20. Механические характеристики АД при изменении числа пар полюсов

Особенности данного способа регулирования:

- небольшой диапазон регулирования, обычно $D = 2 \dots 1$;
- регулирование скорости ступенчатое;
- жесткость характеристик и их стабильность не меняются;
- регулирование осуществляется при постоянном моменте или мощности без снижения перегрузочной способности;
- регулирование экономичное, так как отсутствуют добавочные потери в цепи ротора.

Двухскоростные двигатели часто применяются в электроприводах вентиляторов.

6.8. Тормозные режимы АД

Режим электромагнитного торможения АД используют для экстренной остановки электропривода, например, в аварийных ситуациях, при отклонениях и нарушениях в технологическом процессе и т.д. В подъемно-транспортных устройствах этот режим используется как длительный рабочий режим для опускания груза. При включении двигателя по основной схеме возможно рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть и торможение противовключением.

Рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть возникает в том случае, когда скорость двигателя ω будет больше синхронной скорости ω_0 . Такой режим может возникнуть, например, в двухскоростном двигателе при переходе с высокой скорости на низкую, вызванном изменением числа пар полюсов (рис. 6.21).

Рассмотрим процесс рекуперативного торможения. В установившемся режиме АД работает в точке А. При увеличении числа пар полюсов АД переходит на работу в точку А₁. Двигатель становится генератором и тормозится по участку А₁–В–А₂ искусственной характеристики. Торможение АД на участке А₁–В соответствует рекуперативному торможению.

Этот же вид торможения может быть реализован в приводе по системе ПЧ–АД при остановке двигателя или при переходе с одной характеристики на другую, вызванном уменьшением частоты преобразователя.

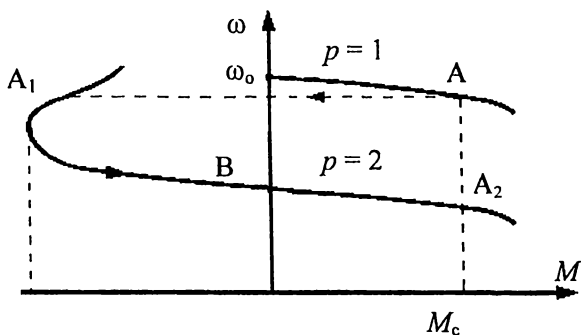


Рис. 6.21. Процесс рекуперативного торможения АД при изменении числа пар полюсов

Рекуперативное торможение может быть осуществлено в подъемно-транспортных устройствах при опускании груза, когда двигатель включается для работы в направлении опускания груза. При этом груз будет опускаться со скоростью ω , большей $-\omega_0$.

Торможение противовключением осуществляется двумя способами: реверсом АД за счет изменения подключения двух фаз обмотки статора к сети или переводом АД в режим протягивающего груза.

Торможение при реверсе рассмотрим по характеристикам рис. 6.22. Пусть точка А характеризует установившийся режим работы двигателя при нормальном направлении вращения. При переключении двух фаз мгновенно изменяется направление вращающегося магнитного поля статора АД. Скольжение в момент переключения $s = (-\omega_0 - \omega)/(-\omega) \approx 2$, так как в двигательном режиме скорость $\omega \approx \omega_0$. Такое большое скольжение АД приводит к значительному увеличению токов в обмотках двигателя. Для их ограничения в цепь ротора вводят добавочное сопротивление. Поэтому при реверсе осуществляется переход в точку А₁ искусственной характеристики с введенным добавочным сопротивлением R'_d , участок А₁–А₂ которой соответствует режиму торможения противовключением. При скорости АД, примерно равной нулю, двигатель необходимо отключить от сети, иначе произойдет его разгон в другую сторону. Процесс торможения можно формировать подбором добавочного сопротивления.

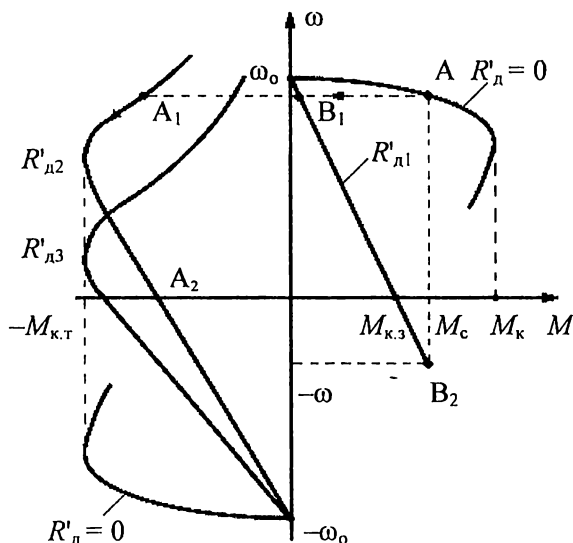


Рис. 6.22. Процесс торможения АД противовключением

Торможение противовключением переводом АД в режим протягивающего груза осуществляется только при активном моменте нагрузки. Для этого АД включается в направлении поднятия груза, а в цепь ротора вводится такое добавочное сопротивление $R'_{д1}$, чтобы момент $M_{к.3}$ двигателя был меньше статического момента M_c . Вследствие превышения M_c над $M_{к.3}$ груз будет опускаться со скоростью $-\omega$. Процесс торможения пойдет по пути А-В₁-В₂ (рис. 6.22). Скорость спускаемого груза можно устанавливать подбором добавочного сопротивления.

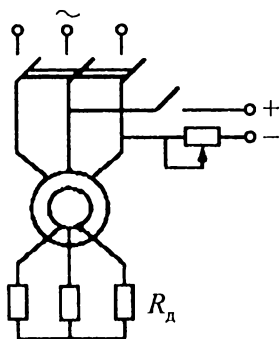


Рис. 6.23. Схема динамического торможения АД

Динамическое торможение АД, схемная реализация которого показана на рис. 6.23, применяется для экстренного торможения двигателя при исчезновении питающего напряжения сети.

При динамическом торможении обмотка статора АД отключается от сети переменного тока и подключается к источнику постоянного тока. Обмотка ротора закорочена, или в ее цепь может быть введено добавочное сопротивление R_d . Постоянный ток, протекающий по обмотке статора, создает неподвижное в пространстве магнитное поле. При вращении ротора в его обмотках под действием этого поля наводятся ЭДС и протекают токи. Взаимодействие токов ротора с результирующим магнитным полем двигателя создает тормозной момент, за счет которого ротор останавливается. При торможении АД работает как генератор и преобразует энергию вращающихся масс в электрическую энергию, рассеиваемую в виде тепла в цепи ротора.

На рис. 6.24 показаны две возможные схемы подключения обмоток статора, соединенных в «звезду», к источнику постоянного тока.

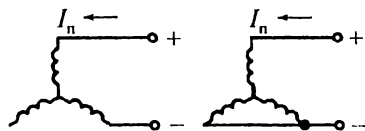


Рис. 6.24. Возможные схемы подключения обмоток статора АД при динамическом торможении

Процесс торможения АД можно формировать изменением добавочного сопротивления R_d в цепи ротора или изменением подаваемого к статору постоянного тока I_n .

Механическая характеристика при динамическом торможении имеет вид

$$M = \frac{2M_{к.т}}{s/s_{к.т} + s_{к.т}/s}, \quad (6.16)$$

где $M_{к.т}$ — критический момент при торможении,

$$M_{к.т} = \frac{3 I_{э\text{кв}}^2 x_{\mu}^2}{2\omega_o (x_{\mu} + x_2')}; \quad s_{к.т} \text{ — критическое скольжение,}$$

$$s_{к.т} = \frac{R_2' + R_d}{(x_{\mu} + x_2')}; \quad I_{э\text{кв}} = I_n/1,22 \text{ — при подключении к источнику}$$

двух фаз, $I_{э\text{кв}} = I_n/1,41$ — при подключении к источнику трех фаз, I_n — постоянный ток от источника.

На рис. 6.25 показаны механические характеристики АД в режиме торможения при разных сопротивлениях R_d . Скольжение АД при динамическом торможении определяется как $s = \omega/\omega_0$. Увеличение R_d приводит к росту критического скольжения $s_{к.т}$, а критический момент $M_{к.т}$ не меняется. Как следует из характеристик, изменением сопротивления R_d можно менять величину тормозного момента, т.е. формировать интенсивность процесса торможения АД.

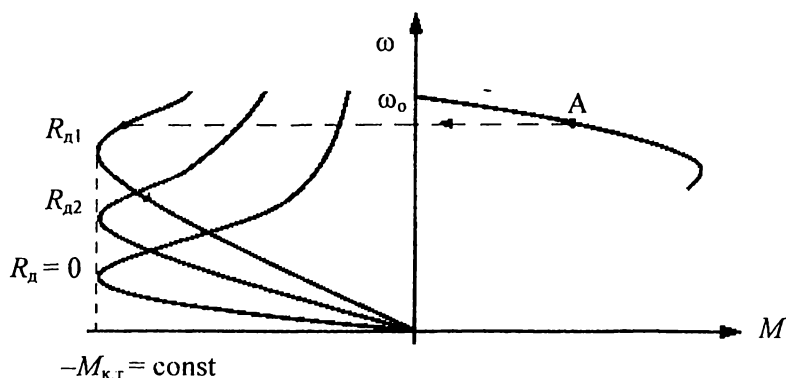


Рис. 6.25. Процесс динамического торможения АД при изменении добавочного сопротивления R_d в цепи ротора ($I_n = \text{const}$)

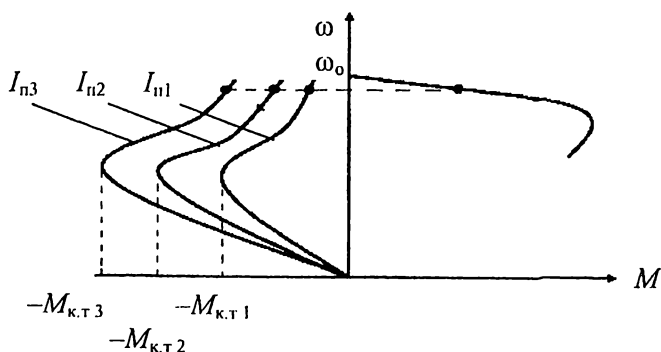


Рис. 6.26. Процесс динамического торможения АД при изменении постоянного тока ($I_{n3} > I_{n2} > I_{n1}$, $R_d = \text{const}$)

Характеристики АД в режиме торможения при изменении постоянного тока I_n приведены на рис. 6.26. Тормозной момент АД пропорционален квадрату тока, следовательно, увеличение тока I_n приводит к росту момента, в том числе и критического момента $M_{к.т.}$, а критическое скольжение $s_{к.т.}$ не меняется.

6.9. Асинхронно-вентильный каскад

6.9.1. Принцип работы асинхронно-вентильного каскада

В основе принципа работы асинхронно-вентильного каскада (АВК) лежит полезное использование мощности скольжения, выделяемой в роторе двигателя. Схема вентильного каскада представлена на рис. 6.27.

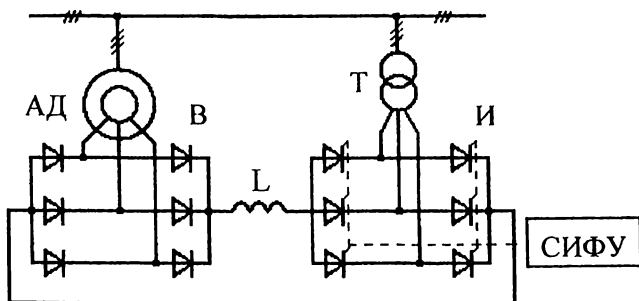


Рис. 6.27. Принципиальная схема асинхронного вентильного каскада

Статорные обмотки АД непосредственно подключаются к питающей сети. В цепь ротора асинхронного фазного двигателя вводится неуправляемый выпрямитель В и управляемый инвертор И, который соединяется с питающей сетью через трансформатор Т. Энергия скольжения преобразуется выпрямителем В в энергию постоянного тока и далее через инвертор И и трансформатор Т отдается в питающую сеть. Индуктивность L сглаживает пульсации выпрямленного тока. Трансформатор Т служит для согласования напряжения сети и напряжения ротора двигателя.

Энергетическая диаграмма, поясняющая преобразование энергии в АВК, показана на рис. 6.28.

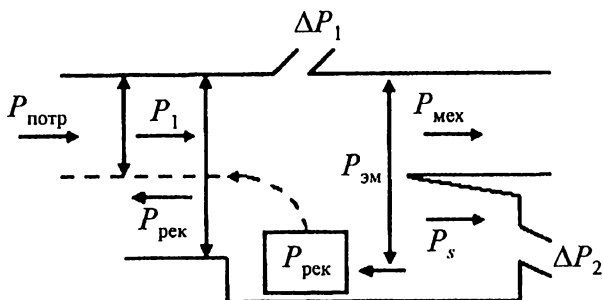


Рис. 6.28. Энергетическая диаграмма асинхронного вентильного каскада

Мощность P_1 , забираемая по цепи статора двигателя из сети, за вычетом потерь в статоре ΔP_1 преобразуется в электромагнитную мощность $P_{эм}$. Мощность $P_{эм}$ разделяется на механическую мощность $P_{мех}$, передаваемую на вал асинхронного двигателя, и электрическую мощность скольжения P_s , трансформируемую в обмотки ротора двигателя. Мощность скольжения за вычетом потерь ΔP_2 в роторе двигателя, выпрямителя, инверторе и трансформаторе инвертора определяет мощность рекуперации $P_{рек}$, которая возвращается в питающую сеть. Таким образом, потребляемая из сети мощность $P_{потр} = P_1 - P_{рек}$. Это определяет более высокий КПД АВК по сравнению с обычным асинхронным двигателем.

Если не учитывать реактивное падение напряжения, обусловленное коммутацией вентилей выпрямителя, то мощность скольжения в цепи выпрямленного тока ротора

$$P_s = K_{сх} E_{рн} s I_{дф}, \quad (6.17)$$

где $K_{сх}$ – коэффициент мостовой схемы выпрямления, $K_{сх} = 1,35$; $E_{рн}$ – номинальная (при $s = 1$) линейная ЭДС ротора; s – скольжение; $I_{дф}$ – выпрямленный ток ротора.

Момент асинхронного двигателя

$$M = \frac{P_s}{\omega_0 s} = \frac{1,35 E_{рн} I_{дф}}{\omega_0}. \quad (6.18)$$

Величина выпрямленного тока ротора определяется разностью выпрямленной ЭДС ротора $E_{дp}$ и ЭДС инвертора $E_{дн}$:

$$I_{дp} = \frac{E_{дp} - E_{дн}}{R_{экв}} = \frac{1,35 E_{pн} s - 1,35 U_{2т} \cos \beta}{R_{экв}}, \quad (6.19)$$

где $U_{2т}$ – линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора; β – угол регулирования вентилей инвертора, $\beta = \pi - \alpha$ ($\alpha \geq \pi/2$); $R_{экв}$ – эквивалентное сопротивление цепи выпрямленного тока ротора (выражение сопротивления не приводится).

Изменяя в инверторе угол β , можно регулировать величину тока ротора $I_{дp}$ и, следовательно, момента АД.

Если $E_{pн} s = U_{2т} \cos \beta$, то ток ротора и момент будут равны нулю. Скольжение, соответствующее этому условию, определяет скольжение холостого хода s_0 двигателя в схеме вентильного каскада

$$s_0 = U_{2т} \cos \beta / E_{pн}. \quad (6.20)$$

Максимальная величина скольжения холостого хода определяется максимальным значением противоЭДС инвертора, которая будет при $\beta = \beta_{\min} = 15^\circ$

$$s_{0 \max} = U_{2т} \cos \beta_{\min} / E_{pн}. \quad (6.21)$$

Таким образом, изменяя угол β , можно регулировать также скорость холостого хода асинхронного двигателя.

6.9.2. Регулирование скорости асинхронно-вентильного каскада

Механические характеристики АВК приведены на рис. 6.30. Характеристики имеют жесткость, примерно в 2 раза меньшую, чем естественная механическая характеристика асинхронного двигателя. Характеристики смещаются параллельно друг другу вдоль оси ординат по мере уменьшения угла регулирования β . Вследствие несинусоидального тока ротора максимальный момент двигателя в АВК меньше критического момента и составляет $M_{\max} = 0,83 M_k$, т.е. перегрузочная способность асинхронного двигателя в схеме каскада снижается на 17 %.

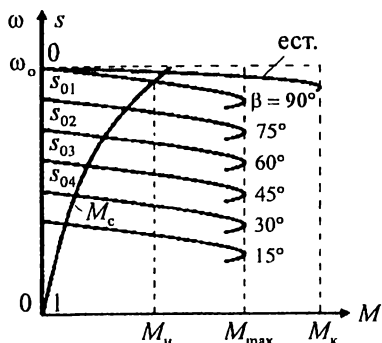


Рис. 6.30. Механические характеристики асинхронного двигателя в схеме вентильного каскада

угол β (например установить $\beta = 60^\circ$), то противоЭДС инвертора $E_{дн}$ увеличится, и она станет больше, чем выпрямленная ЭДС ротора $E_{др}$. Ток ротора $I_{др}$ из-за односторонней проводимости выпрямителя уменьшится до нуля. Момент двигателя станет равным нулю, и под действием момента M_c скольжение двигателя будет возрастать. Это приведет к увеличению ЭДС ротора. Когда скольжение двигателя станет больше s_{02} (для рассматриваемого примера), в цепи ротора появится ток, и двигатель перейдет на механическую характеристику, соответствующую s_{02} . Скорость двигателя будет определяться точкой пересечения линии M_c с данной механической характеристикой. При уменьшении угла β произойдет дальнейшее снижение скорости.

Для увеличения скорости уменьшают противоЭДС инвертора $E_{дн}$, т.е. увеличивают угол регулирования β . Ток ротора при этом возрастает, момент увеличивается, и двигатель разгоняется. По мере увеличения скорости уменьшается выпрямленная ЭДС ротора $E_{др}$. Разгон двигателя будет происходить до тех пор, пока ток ротора не уменьшится до значения, соответствующего статическому моменту.

Глубина регулирования скорости в АВК определяется относительным значением напряжения трансформатора $U_{2т}$, от величины которого зависит максимальное скольжение $s_{0 \max}$. АВК целесообразно применять для привода механизмов с вентиль-

Регулирование скорости в схеме АВК осуществляется путем изменения скольжения двигателя при постоянной скорости вращения электромагнитного поля. Рассмотрим принцип регулирования скорости в каскаде. Если установить угол регулирования $\beta = 90^\circ$, то противоЭДС инвертора $E_{дн}$ будет равна нулю. Этому условию соответствует верхняя механическая характеристика. Если при наличии момента M_c на валу двигателя уменьшить

торным моментом сопротивления (насосы, вентиляторы, воздуховоды и др.), для которых снижение скорости составляет не более 50 % от номинальной. В этом случае мощности трансформатора и инвертора в 2 раза меньше мощности асинхронного двигателя, что существенно уменьшает стоимость электропривода.

Ориентировочно мощность трансформатора определяется выражением

$$S_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{дв}} s_{\text{max}}}{0,965 \eta_{\text{дв}}}, \quad (6.22)$$

т.е. составляет часть мощности двигателя, пропорциональную максимальному скольжению.

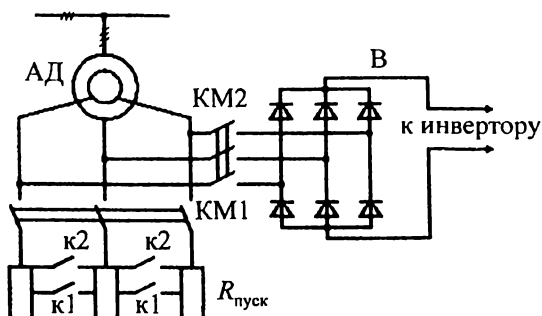


Рис. 6.31. Схема пуска асинхронного вентильного каскада

В случае использования в АВК для регулирования неполного диапазона изменения скорости возникает проблема пуска двигателя до нижней рабочей скорости в схеме каскада. Обычно в этом случае используется схема реостатного пуска. Одна из возможных схем пуска показана на рис. 6.31. В этой схеме двигатель разгоняется при включенном контакторе KM1 и отключенном KM2 по схеме реостатного пуска. Шунтирование ступеней пускового реостата $R_{\text{пуск}}$ осуществляется контакторами ускорения K1 и K2. При достижении скорости выше, чем $\omega_0(1 - s_{0\text{max}})$, включается контактор KM2, затем отключается контактор KM1, и двигатель переходит на работу в схеме вентильного каскада.

Глава 7 СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

7.1. Общие сведения

Синхронные двигатели (СД) находят все большее применение в электроприводах различных механизмов, что объясняется их значительными преимуществами по сравнению с асинхронными двигателями. СД являются простым и эффективным средством повышения коэффициента мощности. Статическая перегрузочная способность СД зависит от напряжения питающей сети линейно, а не квадратично, как у АД. СД с автоматическим регулированием возбуждения обладает более высокой кратностью максимального момента, чем АД. СД имеют большой воздушный зазор, поэтому надежность работы их выше и лучше отвод тепла, чем у АД.

Благодаря хорошим энергетическим показателям по коэффициенту мощности, КПД и перегрузочной способности синхронные двигатели все больше вытесняют асинхронные двигатели в мощных приводах с длительным режимом нагрузки, в том числе и с ударной нагрузкой. Синхронный привод широко используется в приводах крупных вентиляторов, компрессоров, насосов, воздуходувок, в главных приводах непрерывных прокатных станов, шаровых мельниц, дробилок и т.д.

В отечественной промышленности для нерегулируемых приводов мощностью свыше 2000 кВт почти исключительно используют СД. Совершенствование систем пуска и возбуждения СД наметило тенденцию замены АД на СД и в приводах меньшей мощности.

До недавнего времени синхронный электропривод в основном был нерегулируемым. В настоящее время в связи с внедрением частотных преобразователей СД находит все большее применение и в регулируемом электроприводе. Двигатели выпускаются преимущественно сериями (СДН, СДНЗ, СДКП, СДТ и др.) мощностью от нескольких киловатт до десятков мегаватт.

Схема включения СД с электромагнитным возбуждением приведена на рис. 7.1. Статор СД подобен статору асинхронного двигателя. Трехфазные токи статора создают вращающееся

в пространстве магнитное поле Φ_1 , угловая скорость вращения которого равна $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$.

Ротор СД по конструкции бывает явнополюсным и неявнополюсным. На роторе расположена обмотка возбуждения, которая питается постоянным током от возбудителя. Ток возбуждения создает постоянное магнитное поле Φ_0 , вращающееся в рабочем режиме вместе с ротором. Взаимодействие полей статора и ротора создает электромагнитный момент

$$M = k\bar{\Phi}_1 \cdot \bar{\Phi}_0, \quad (7.1)$$

под действием которого ротор в установившемся рабочем режиме вращается синхронно с полем статора.

В режиме холостого хода, когда на валу СД момент сопротивления отсутствует, векторы магнитных полей статора и ротора совпадают в пространстве и вращаются синхронно со скоростью ω_0 . Угол θ между векторами магнитных полей называется углом нагрузки, и в режиме холостого хода $\theta = 0$ (рис. 7.2).

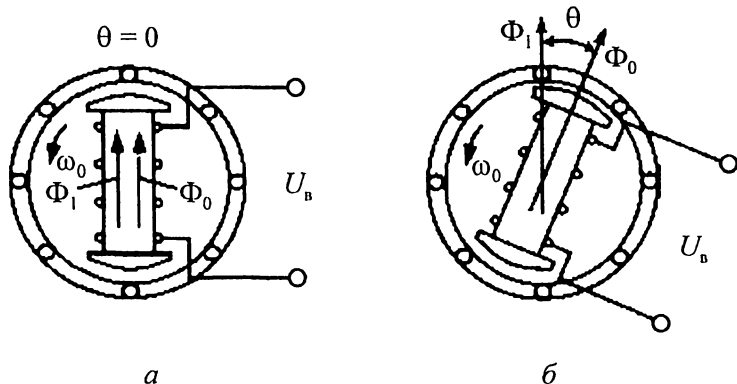


Рис. 7.2. Направление магнитных полей обмоток СД: а – режим холостого хода; б – режим нагрузки

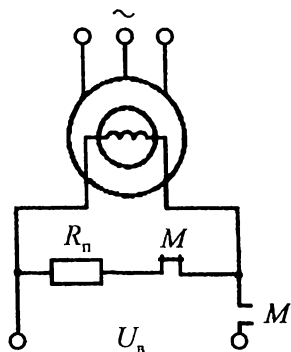


Рис. 7.1. Схема включения синхронного двигателя

В нагрузочном режиме работы, когда к валу машины прикладывается нагрузочный момент, векторы магнитных полей расходятся на угол нагрузки θ . Чем больше нагрузочный момент, тем больше угол θ . В зависимости от знака угла θ машина может работать в режиме двигателя или генератора. В режиме двигателя вектор поля ротора отстает от вектора поля статора, электромагнитный момент двигателя положителен, при этом угол нагрузки $\theta > 0$. В режиме генератора вектор поля ротора опережает вектор поля статора, электромагнитный момент генератора отрицателен, угол $\theta < 0$.

7.2. Механическая характеристика СД

Механическая характеристика СД приведена на рис. 7.3. Ротор СД в установившемся рабочем режиме вращается синхронно с магнитным полем статора, поэтому при увеличении

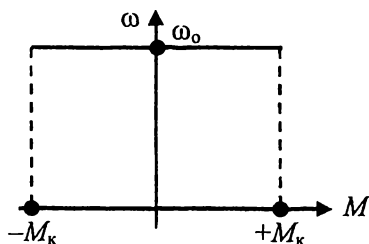


Рис. 7.3. Механическая характеристика СД в синхронном режиме

нагрузочного момента, а следовательно, и электромагнитного момента синхронной машины скорость ротора остается неизменной и равной ω_0 .

Однако синхронное вращение ротора может быть нарушено при значительной нагрузке на валу, когда нагрузочный момент превысит критический момент M_k . В этом случае синхронная машина выпадает из

синхронизма. Жесткость характеристики в синхронном режиме равна бесконечности.

7.3. Угловая характеристика СД

Электромагнитный момент двигателя M зависит от угла нагрузки θ . Эта зависимость называется угловой характеристикой. Для ее получения запишем выражение электромагнитного момента двигателя при работе в синхронном режиме. Так как ротор двигателя вращается с синхронной скоростью, то потери скольжения отсутствуют, и вся электромагнитная мощность P_z

преобразуется в механическую мощность P_2 на валу двигателя. Если пренебречь потерями в статоре, то можно записать

$$P_{эм} = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 = P_2 = M\omega_0, \quad (7.2)$$

отсюда электромагнитный момент

$$M = \frac{3U_1 I_1 \cos \varphi_1}{\omega_0}. \quad (7.3)$$

В этом выражении момент не является функцией угла нагрузки θ . Для получения угловой характеристики $M = f(\theta)$ рассмотрим схему замещения неявнополюсного СД, составленную без учета активного сопротивления обмотки статора (рис. 7.4).

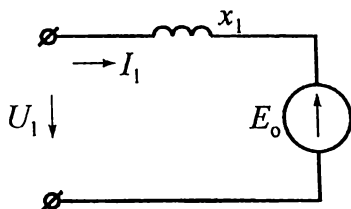


Рис. 7.4. Схема замещения СД в синхронном режиме

Запишем уравнение электрического равновесия для данной схемы

$$U_1 = E_0 + jI_1 x_1, \quad (7.4)$$

где U_1 , I_1 , x_1 — напряжение, ток и синхронное индуктивное сопротивление статорной обмотки двигателя; E_0 — ЭДС, наводимая в обмотках статора магнитным полем ротора. Этому уравнению соответствует векторная диаграмма (рис. 7.5).

Из векторной диаграммы можно получить следующие выражения:

$$AB = U_1 \sin \theta = I_1 x_1 \cos(\varphi_1 - \theta)$$

$$\text{или } I_1 = \frac{U_1 \sin \theta}{x_1 \cos(\varphi_1 - \theta)};$$

$$OD = U_1 \cos \varphi_1 = E_0 \cos(\varphi_1 - \theta).$$

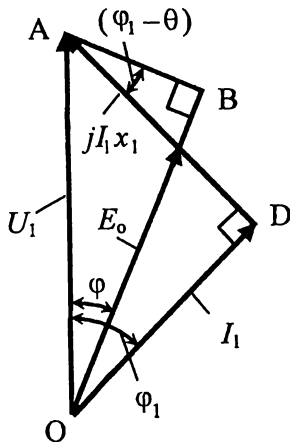


Рис. 7.5. Векторная диаграмма СД

Подставляя два последних выражения в формулу электромагнитного момента, получим угловую характеристику неявнополюсного СД, представленную на рис. 7.6:

$$M = \frac{3U_1 E_o}{\omega_0 x_1} \sin \theta \quad (7.7)$$

Максимальный момент, развиваемый неявнополюсным двигателем при угле нагрузки $\theta = 90^\circ$, называется критическим,

$$M_k = \frac{3U_1 E_o}{\omega_0 x_1}. \quad (7.8)$$

Номинальный угол нагрузки $\theta_n = 20 \dots 30^\circ$. Перегрузочная способность двигателя $\lambda = M_k / M_n = 1,5 \dots 2,5$.

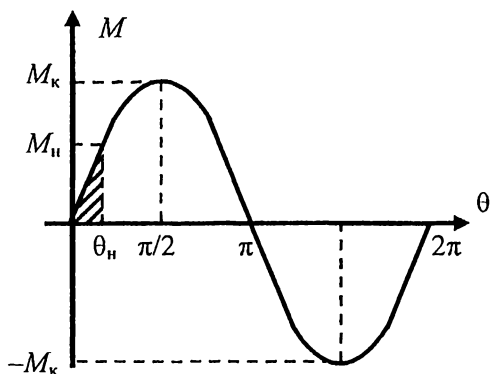


Рис. 7.6. Угловая характеристика неявнополюсного СД

Если нагрузка превышает критический момент, то двигатель выпадает из синхронизма. Из выражения критического момента следует, что в отличие от АД момент СД пропорционален напряжению в первой степени, т.е. зависит от напряжения в меньшей степени. В то же время момент СД зависит от тока возбуждения, поэтому для сохранения перегрузочной способности двигателя при снижении напряжения применяют форсировку возбуждения.

Для явнополюсного СД угловая характеристика представлена на рис. 7.7. Уравнение угловой характеристики имеет вид

$$M = \frac{3U_1 E_o}{\omega_o x_d} \sin \theta + \frac{3U_1^2}{2\omega_o} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (7.9)$$

где x_d и x_q – синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора соответственно по продольной и поперечной осям ротора.

Критический момент для явнополюсного СД создается при угле нагрузки θ , меньшем 90° . Второе слагаемое электромагнитного момента обусловлено реактивным моментом за счет явнополюсности ротора. Максимальная величина реактивного момента равна $(0,15-0,2)M_k$. Перегрузочная способность явнополюсного двигателя выше, чем неявнополюсного двигателя.

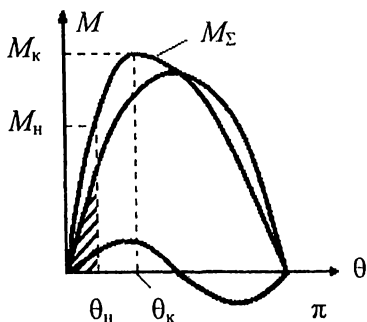


Рис. 7.7. Угловая характеристика явнополюсного СД (M_Σ – суммарный момент явнополюсной машины)

7.4. Режимы работы СД

7.4.1. Пуск синхронных двигателей

В настоящее время для СД применяют следующие способы пуска: прямой асинхронный пуск – непосредственно от сети или реакторный при пониженном напряжении питания; частотный синхронный пуск с помощью статического преобразователя частоты; пуск с помощью разгонного двигателя и т.д.

Прямой асинхронный пуск отличается простотой и экономичностью. Для этого в конструкции ротора СД предусмотрена пусковая или демпферная обмотка, подобная обмотке короткозамкнутого АД. Пуск двигателя происходит по пусковой механической характеристике (рис. 7.8) до подсинхронной скорости,

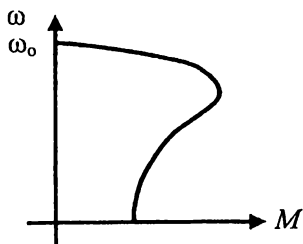


Рис. 7.8. Механическая характеристика СД при пуске

примерно равной $0,95\omega_0$. Затем возбуждают обмотку ротора и осуществляют синхронизацию двигателя с сетью. Пусковая клетка рассчитана на непродолжительный режим работы, порядка 30 секунд. Поэтому длительная работа СД в асинхронном режиме недопустима. Пусковая обмотка выполняет также роль демпферной или успокоительной обмотки, которая стабилизирует переходные процессы двигателя при работе в синхронном режиме.

При асинхронном пуске в роторе СД выделяется большое количество тепла, что требует усложнения конструкции ротора, определенных требований к его охлаждению, и приводит к увеличению стоимости машины. Большие пусковые токи вызывают значительное снижение напряжения питающей сети, что неблагоприятно отражается на смежных потребителях. Обмотки СД подвергаются значительным электродинамическим и механическим воздействиям. Все это относится к недостаткам асинхронного пуска СД.

При пуске с помощью вспомогательного разгонного двигателя его вал жестко связан с валом запускаемого СД. В качестве разгонного двигателя обычно используют АД с фазным ротором с числом полюсов, равным числу полюсов СД. Пуск АД с фазным ротором осуществляется при небольших токах. СД разгоняется до подсинхронной скорости, а затем подключается к сети методом самосинхронизации. Токи при таком включении СД по величине практически не отличаются от токов СД при прямом асинхронном пуске, но время их действия существенно меньше. Недостатком данного способа является то, что после пуска СД разгонный двигатель не используется, хотя в практике есть примеры, когда разгонный двигатель после его возбуждения и синхронизации с сетью использовался в качестве компенсатора реактивной мощности или возбуждателя СД.

Частотный синхронный пуск с помощью статического преобразователя частоты в настоящее время является одним из перспективных и рациональных решений проблемы пус-

ка СД. Детально ознакомиться с этим способом пуска можно по многочисленным публикациям в отечественной и зарубежной технической литературе. К достоинствам данного способа пуска СД следует отнести то, что один СПЧ может быть использован для пуска нескольких СД, а к недостаткам – сложность преобразователя частоты и, как следствие этого, особое внимание при выборе данного способа пуска должно быть уделено надежности СПЧ.

7.4.2. Синхронный режим

Синхронный режим обеспечивается при возбужденном состоянии двигателя и при нагрузке, не превышающей критический момент. При этом синхронная машина может работать в режиме двигателя при $\theta > 0$ или в режиме генератора при $\theta < 0$.

Особенностью СД является то, что он может быть использован в системе электроснабжения как компенсатор реактивной мощности. Возможность работы СД в этом качестве иллюстрируют U-образные характеристики (рис. 7.11), представляющие зависимости тока статора I_1 и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от тока возбуждения I_b .

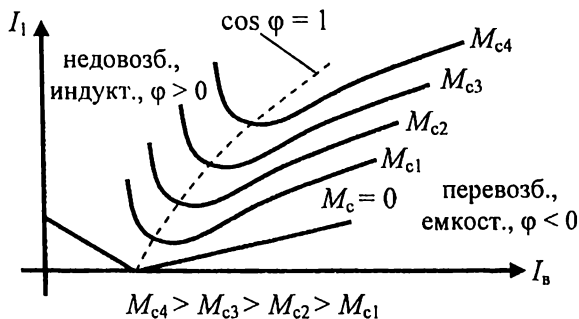


Рис. 7.11. К вопросу регулирования реактивной мощности СД изменением тока возбуждения

Регулирование реактивной мощности обеспечивается за счет изменения тока возбуждения. При небольших токах возбуждения СД работает с отстающим $\cos \varphi$ и потребляет из сети ре-

активную мощность – область характеристик слева от штриховой линии. При больших токах возбуждения СД работает с опережающим $\cos \varphi$ и отдает в сеть реактивную мощность – область характеристик справа от штриховой линии.

Режим работы СД с $\cos \varphi = 1$ отмечен штриховой линией. При этом реактивная мощность из сети не потребляется, а ток статора наименьший по величине. Этот режим наиболее выгодный для двигателя, так как потери в статоре минимальны.

Следует отметить, что с ростом механической нагрузки область генерации реактивной мощности смещается в сторону больших токов возбуждения. Поэтому при переменной нагрузке на валу для полного использования компенсирующих свойств СД необходимо соответствующее регулирование тока возбуждения.

Изменение тока возбуждения СД осуществляется специальной системой автоматического регулирования возбуждения. При этом решаются две задачи:

- обеспечение устойчивой работы СД в синхронном режиме при уменьшении напряжения питающей сети или при набросах нагрузки, осуществляемое форсировкой возбуждения;
- автоматическое регулирование величины реактивной мощности, циркулирующей в статорной цепи двигателя, что является достоинством СД.

7.4.3. Тормозной режим СД

Для торможения СД применяется, как правило, динамическое торможение. При этом обмотка статора отключается от сети и замыкается накоротко или на гасящее сопротивление. Машина работает в режиме генератора, преобразуя энергию вращающихся масс в тепловую энергию, выделяемую в обмотке статора и на гасящем сопротивлении. Механические характеристики при динамическом торможении подобны характеристикам АД.

7.5. Возбуждение СД

Системы возбуждения должны быть надежны во всех режимах работы СД, обеспечивать регулирование тока возбуждения при изменении нагрузки в пределах номинальной и форси-

ровку возбуждения в аварийных режимах, иметь достаточное быстроедействие.

Первоначально преимущественное распространение получили электромашинные системы возбуждения, в которых обмотка возбуждения СД питалась от возбудителя – специального генератора постоянного тока небольшой мощности. Возбуждение СД в таких системах осуществлялось по нескольким схемам:

- от возбудителя, приводимого во вращение отдельным двигателем;
- от возбудителя, находящегося на одном валу с двигателем.

По мере производства надежных полупроводниковых выпрямителей все большее распространение получали системы возбуждения с кремниевыми диодами или тиристорами. В настоящее время они повсеместно применяются для синхронных двигателей, генераторов и компенсаторов любой мощности. Наиболее распространенными статическими системами возбуждения являются системы:

- с возбуждением от тиристорного возбудителя;
- с возбуждением от бесщеточного возбудителя.

Схема *тиристорного* возбуждения представлена на рис. 7.9. Возбудитель СД представляет собой управляемый выпрямитель В, построенный по трехфазной нулевой схеме. Выпрямитель питается от трансформатора Т, подключенного к сети. На время пуска двигателя выпрямитель В шунтируется открытым тиристором T_2 .

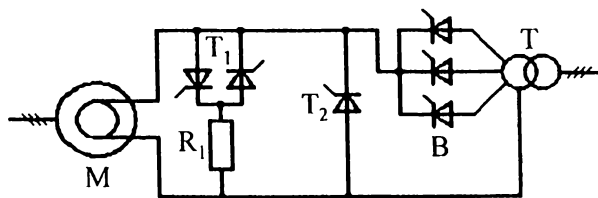


Рис. 7.9. Схема тиристорного возбуждения СД

При асинхронном пуске СД в его обмотке возбуждения индуцируется ЭДС скольжения. Тиристоры T_1 открыты, и обмотка возбуждения СД замкнута на разрядный резистор R_1 . При

достижении подсинхронной скорости тиристоры T_1 закрываются и снимают шунтирование обмотки возбуждения СД. Тиристор T_2 закрывается. После этого постоянный ток выпрямителя В подается в обмотку возбуждения СД. Ток возбуждения СД регулируется изменением напряжения выпрямителя В.

Схема бесщеточного возбуждения приведена на рис. 7.10. Возбудитель состоит из обращенного синхронного генератора Г, трехфазный ротор которого расположен на валу СД. В обмотку возбуждения генератора Г подается постоянный ток. При вращении ротора генератора Г в его трехфазных обмотках наводится ЭДС, которая выпрямляется с помощью выпрямителя В. Выпрямитель В на время разгона-двигателя СД шунтируется резистором R_2 через открытый тиристор T_2 .

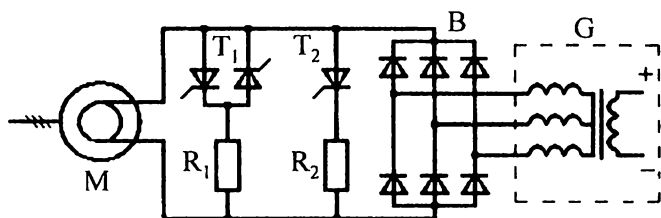


Рис. 7.10. Схема бесщеточного возбуждения СД

При асинхронном пуске СД в его обмотке возбуждения индуктируется ЭДС скольжения. Тиристоры T_1 открыты, и обмотка возбуждения СД замкнута на разрядный резистор R_1 . При достижении подсинхронной скорости тиристоры T_1 закрываются и снимают шунтирование обмотки возбуждения. После этого постоянный ток выпрямителя В подается в обмотку возбуждения СД. Ток возбуждения СД регулируется изменением тока возбуждения возбудителя Г.

7.6. Частотное регулирование скорости СД

Возможность частотного регулирования скорости появилась в связи с разработкой и внедрением частотных преобразователей. Частотное регулирование является единственным способом регулирования скорости СД и характеризуется в основ-

ном теми же показателями, что и частотное регулирование АД с короткозамкнутым ротором.

Для упрощения рассмотрим частотное регулирование неявнополюсного СД. Электромагнитный момент двигателя

$$M = \frac{3U_1 E_0}{\omega_0 x_1} \sin \theta = \frac{3U_1 x_{ad} I_b}{\omega_0 x_1} \sin \theta, \quad (7.10)$$

где E_0 – ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, $E_0 = x_{ad} I_b$; x_{ad} – индуктивное сопротивление взаимной индукции по продольной оси; I_b – ток возбуждения. Представим момент в виде выражения

$M = A \frac{U}{f} I_b \sin \theta$, где A – постоянная величина, $A = 3x_{ad}/2\pi x_d$.

Рассмотрим режим частотного регулирования, когда используется закон $\frac{U}{f} = \text{const}$. При данном законе зависимость для момента принимает вид

$$M = C I_b \sin \theta, \quad (7.11)$$

где C – постоянная величина, $C = A \frac{U}{f}$.

Критический момент $M_k = C I_b$ при $I_b = I_{bn}$ остается неизменным, т.е. перегрузочная способность двигателя остается без изменений. Регулирование скорости СД в этом режиме осуществляется при постоянном моменте.

Для регулирования СД при частотах выше номинальной частоты питающего напряжения используется закон регулирования, при котором $U = \text{const}$; $I_b = \text{const}$; $f = \text{var}$

Электромагнитный момент в этом случае

$$M = \frac{C_1}{f} \sin \theta, \quad (7.12)$$

где C_1 – постоянная, $C_1 = A U I_b$

Критический момент $M_k = C_1 I_b / f$. Из этого выражения видно, что при повышении частоты питающего напряжения критический момент СД уменьшается, т.е. снижается его пе-

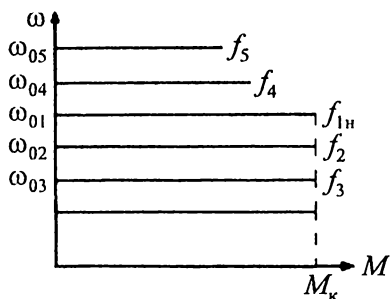


Рис. 7.12. Механические характеристики СД при частотном регулировании ($f_5 > f_4 > f_{1н} > f_2 > f_3$)

регрузочная способность. Регулирование скорости при этом осуществляется при постоянной мощности.

Таким образом, при частотном регулировании можно осуществить двухзонное регулирование скорости СД: при постоянном моменте регулирования в зоне до номинальной скорости, а при постоянной мощности – выше номинальной скорости. Механические характеристики при частотном регулировании скорости СД приведены на рис. 7.12.

Как уже отмечалось, частотный преобразователь может применяться не только для регулирования скорости СД, но и для частотного пуска двигателя.

7.7. Синхронный привод на базе двухмашинного агрегата

Проблема пуска СД успешно решается при каскадном его запуске, который реализован в электроприводе СД на базе двухмашинного агрегата (ДА). Эта система привода близка к системе пуска СД с помощью вспомогательного разгонного двигателя. При этом на период пуска ДА представляет собой электромеханический каскад, а в рабочем режиме – двухдвигательный синхронный электропривод. Особо отметим, что вспомогательный двигатель в ДА выполняет две функции: при пуске – роль разгонного двигателя, а в рабочем режиме – дополнительного рабочего двигателя.

Синхронный электропривод на базе ДА разработан на кафедре электротехники и электромеханики Пермского государственного технического университета и впервые в мировой практике внедрен на приводе прокатного стана Северского трубного завода (г. Полевской, Свердловская область).

ДА состоит из главного синхронного двигателя и вспомогательного асинхронного двигателя с фазным ротором с одинаковым числом пар полюсов, роторы которых жестко соединены между собой. Мощность электропривода на базе ДА равна суммарной установленной мощности СД и АД.

Принципиальная схема ДА при пуске представлена на рис. 7.13. Схема содержит выключатели: V_1 – для подключения электромеханического каскада к сети; V_2 – для последовательного соединения статорных обмоток двигателей; V_3 – для шунтирования обмоток статора АД на заключительной стадии каскадного пуска; V_4 – для подключения АД к сети; $V_{СД}$ – возбудитель СД; $V_{АД}$ – возбудитель АД; контакторы: K_1 – для подключения пускового реостата ПР в цепь ротора АД; K_2 – для включения тока возбуждения АД; K_3 – для включения тока возбуждения СД.

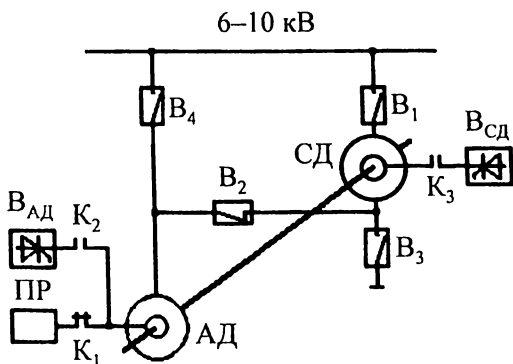


Рис. 7.13. Принципиальная схема ДА при каскадном пуске: СД – синхронный двигатель; АД – асинхронный двигатель; V_1 , V_2 , V_3 , V_4 – выключатели; K_1 , K_2 , K_3 – контакторы; $V_{АД}$, $V_{СД}$ – возбудители двигателей; ПР – пусковой реостат

При пуске статорные обмотки двигателей ДА соединяются последовательно, выключатели V_1 , V_2 и контактор K_1 замкнуты, а выключатели V_3 , V_4 и контакторы K_2 и K_3 разомкнуты.

Напряжения на двигателях при пуске пропорциональны их полным сопротивлениям, а момент агрегата определяется суммой моментов двигателей

$$M_k = M_{АД} + M_{СД}. \quad (7.13)$$

Процесс пуска ДА можно разделить на три этапа.

Первый этап начинается с включения выключателя B_1 и длится в течение всего времени разгона до подсинхронной скорости. Наличие пускового реостата в цепи ротора АД позволяет ограничить величину пускового тока и производить пуск ДА при токе, меньшем номинального тока СД.

Напряжение на АД при пуске составляет $\approx 0,9 U_n$, а на СД – $\approx 0,1 U_n$. Это объясняется тем, что сопротивление АД примерно на порядок выше сопротивления СД. Поэтому основную часть момента ДА при пуске составляет момент, развиваемый АД.

Второй этап пуска начинается с процесса синхронизации ДА. На подсинхронной скорости возбуждается АД, и агрегат плавно входит в синхронизм. Возбуждение АД осуществляется контактором K_2 . Затем срабатывает контактор K_1 и возбуждается СД. При соответствующем выборе токов возбуждения

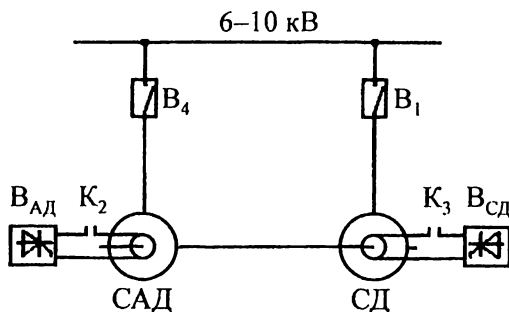


Рис. 7.14. Принципиальная схема ДА в рабочем режиме: СД – синхронный двигатель; САД – синхронизированный асинхронный двигатель; B_1 , B_4 – выключатели; K_2 , K_3 – контакторы; $B_{АД}$, $B_{СД}$ – возбуждители двигателей

напряжение на СД увеличивается до U_n , а на АД уменьшается практически до нуля. Снижение напряжения на АД объясняется размагничивающим действием реакции якоря.

На *третьем этапе* срабатывает выключатель B_3 , который шунтирует АД и производит сборку статорных обмоток СД в «звезду». Одновременно контактор K_2 разрывает цепь питания обмотки ротора АД постоянным током. Затем выключателем B_2 разрываются последовательно соединенные статорные обмотки двигателей.

Вспомогательный двигатель в дальнейшем используется в рабочем режиме как синхронизированный асинхронный двигатель (САД). Подключение САД к сети осуществляется выключателем B_4 , а возбуждение двигателя – контактором K_2 . Таким образом, ДА в рабочем режиме представляет собой двухдвигательный синхронный электропривод (рис. 7.14).

7.8. Угловая характеристика ДА

Угловая характеристика ДА приведена на рис. 7.15.

Для полного использования установленной мощности угловые положения роторов САД и СД сдвинуты на угол $\gamma = -60$ эл. град. Вследствие этого угловые характеристики

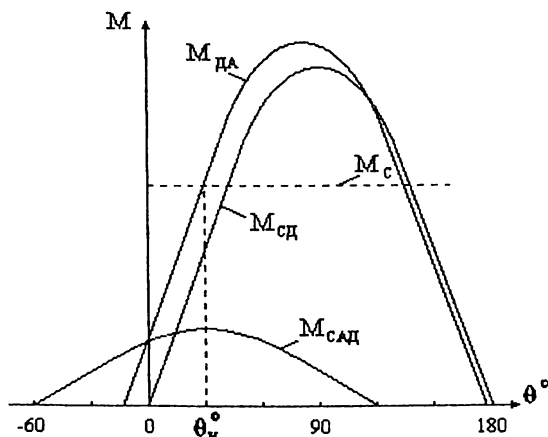


Рис. 7.15. Угловая характеристика ДА в рабочем режиме

двигателей сдвигаются относительно друг друга на этот же угол. Распределение нагрузки между двигателями в ДА происходит так, что при номинальной загрузке на валу СД нагружен на номинальную мощность, его угол нагрузки $\theta_{н\text{ СД}} = 30^\circ$, а САД нагружен на максимальную мощность, равную его номинальной мощности, при угле нагрузки $\theta_{\text{САД}} = 90^\circ$

Глава 8

ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

8.1. Основные понятия

Системой регулирования электроприводом называется система, которая позволяет в широких пределах изменять выходные координаты привода в соответствии с технологическими процессами. В состав систем регулирования обычно входят управляемые преобразователи постоянного или переменного тока.

В зависимости от назначения и требований, предъявляемых к электроприводу, различают два типа систем регулирования: разомкнутая система и замкнутая система.

Разомкнутой системой регулирования называется система, в которой отсутствует обратная связь по выходной регулируемой координате. На рис. 8.1 приведена функциональная схема разомкнутой системы регулирования электроприводом.

В такой системе фактическое значение регулируемой координаты Y существенно зависит от возмущений f , так как сигнал задания X_z постоянный и не зависит от отклонений регулируемой координаты от заданного значения.

Замкнутой системой регулирования называется система, в которой имеется обратная связь по выходной координате. Обратная связь представляет собой канал передачи информации с выхода системы на вход с целью формирования сигнала управления.

Функциональная схема замкнутой системы регулирования приведена на рис. 8.2. Сигнал управления U в замкнутой системе формируется из сигнала задания X_z и сигнала обратной связи Z , несущего информацию о фактическом значении регу-

лируемой величины Y . В зависимости от знака Z обратная связь бывает положительной и отрицательной. При положительной связи сигнал обратной связи суммируется с X_3 . При отрицательной обратной связи сигнал обратной связи вычитается из сигнала задания.

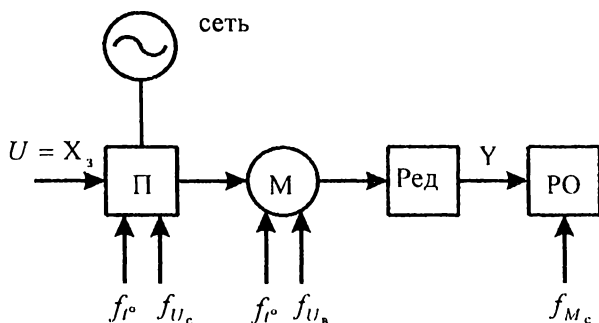


Рис. 8.1. Функциональная схема разомкнутой системы регулирования электроприводом: П – управляемый преобразователь; М – двигатель; Ред – редуктор; РО – рабочий орган; возмущения: f_{I° – по температуре; f_{U_c} – по напряжению; f_{U_b} – по возбуждению; f_{M_c} – по нагрузке; Y – регулируемая координата; X_3 – задание

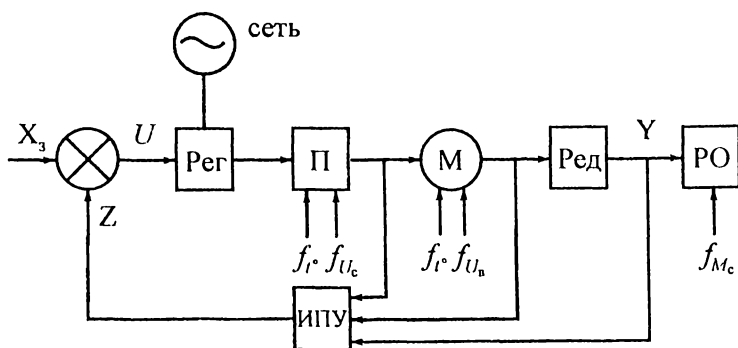


Рис. 8.2. Функциональная схема замкнутой системы регулирования электроприводом: ИПУ – информационно-преобразовательное устройство; X_3 – задание; Z – сигнал обратной связи; $U = X_3 \pm Z$ – сигнал управления; Рег – регулятор; П – преобразователь; Y – регулируемая координата; f – возмущения

По характеру действия различают жесткие, гибкие и нелинейные обратные связи с зонами нечувствительности. Если обратная связь действует только на время переходного процесса, то она называется гибкой. Если обратная связь начинает действовать только с определенного уровня регулируемой координаты Y , то такая связь называется связью с отсечкой.

Жесткие обратные связи действуют в течение всего времени и в первую очередь служат для формирования статических режимов электропривода. Гибкие обратные связи действуют только в течение переходного процесса и служат для формирования желаемых динамических показателей при регулировании выходных координат.

В результате введения обратной связи ошибка регулирования уменьшается до допустимого значения. При этом ни одно из возмущений не измеряется, а их влияние на регулируемую величину воспринимается системой по каналу обратной связи. Регулирование выходной координаты в таких системах, как правило, осуществляется по принципу отклонения.

8.2. Классификация замкнутых систем регулирования

Замкнутые системы регулирования электроприводом классифицируются по принципу действия и по выходным регулируемым координатам.

Классификация систем по принципу действия:

1. *Системы электропривода с непрерывным управлением* – это такие системы, в которых каждый из выходных параметров системы изменяется непрерывно во времени или остается постоянным. Примером такой системы является замкнутая система (см. рис. 8.2).

2. *Системы электропривода с релейным управлением* – это системы, в которых в прямом канале регулирования на входе двигателя имеется релейный элемент, регулировочная характеристика которого имеет два устойчивых состояния (рис. 8.3):

$$U_{\text{вых}} = +U_{\text{п}}, \text{ если } U_{\text{вх}} > 0,$$

$U_{\text{вых}} = 0$ (или $-U_{\text{п}}$), если $U_{\text{вх}} < 0$, где $U_{\text{п}}$ – напряжение питания двигателя.

Функциональная схема замкнутой системы регулирования с релейным управлением приведена на рис. 8.4.

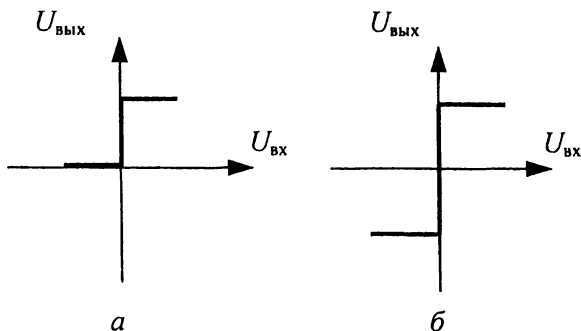


Рис. 8.3. Регулировочная характеристика идеального реле: а – однополярное; б – двухполярное

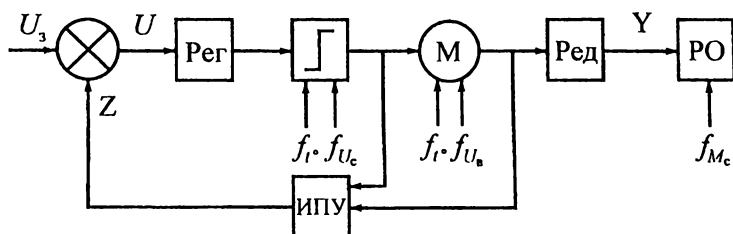


Рис. 8.4. Функциональная схема замкнутой системы регулирования электроприводом с релейным управлением

3. Системы электропривода с импульсным управлением – это системы, в которых в прямой цепи регулирования имеется импульсный элемент, преобразующий непрерывный сигнал в последовательность импульсов. На практике используются 2 типа импульсных преобразователей:

- с амплитудно-импульсным модулятором (АИМ), формирующим последовательность импульсов с переменной амплитудой и постоянным периодом и длительностью;

- с широтно-импульсным модулятором (ШИМ), формирующим последовательность импульсов с переменной длительностью и с постоянным периодом и амплитудой.

4. *Системы электропривода с цифровым управлением* (например микропроцессорное управление) – это системы, в которых переменные преобразуются в цифровой код. Эти системы формируются на базе микропроцессоров, реализующих в цифровой форме функции регулятора и информационно-преобразовательного устройства.

Классификация по выходным регулируемым координатам:

1. *Системы регулирования скорости.* Они используются в электроприводах многих технологических установок. Эти системы делятся на две группы:

– системы стабилизации скорости, у которых скорость поддерживается постоянной, несмотря на возмущения;

– системы управления скоростью, в которых скорость рабочего органа регулируется с повышенной точностью в широких пределах в соответствии с технологическим процессом.

2. *Системы регулирования момента.* Применяются, например, в электроприводах систем натяжения металла в листопрокатном производстве.

3. *Системы регулирования положения рабочего органа.* Эти системы используются в приводах роботов, манипуляторов и других промышленных установках. Системы подразделяются на две группы:

– системы позиционирования, в которых задаются исходное и конечное положение рабочего органа, а траектория перемещения не контролируется;

– следящие системы электропривода, в которых задается и непрерывно контролируется вся траектория перемещения рабочего органа, при этом обеспечивается требуемая точность перемещения.

8.3. Система управляемый преобразователь – двигатель, замкнутая по скорости

Если жесткость характеристик в разомкнутой системе является недостаточной, то она может быть повышена за счет введения отрицательной обратной связи по скорости. Функциональная схема замкнутого электропривода с обратной связью по скорости показана на рис. 8.5.

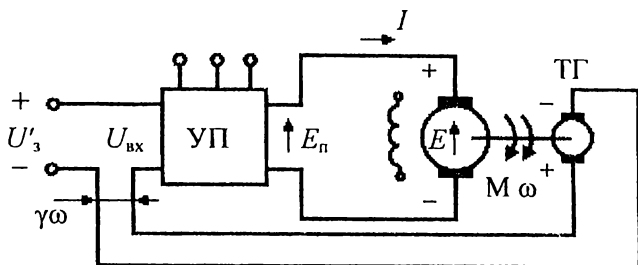


Рис. 8.5. Система управляемый преобразователь двигатель, замкнутая по скорости: УП – управляемый преобразователь; М – двигатель; ТГ – тахогенератор; $\gamma\omega$ – сигнал обратной связи; U'_3 – напряжение задания; $U_{\text{вх}}$ – сигнал управления преобразователем

В такой системе в отличие от разомкнутой добавлен тахогенератор, сигнал которого $\gamma\omega$ есть сигнал обратной связи по скорости. Этот сигнал складывается с сигналом задания, который затем подается на управляемый преобразователь: $U_{\text{вх}} = U'_3 - \gamma\omega$. Таким образом, сигнал управления формируется не только заданием, но и информацией о текущей скорости. Механические характеристики системы управляемый преобразователь – двигатель (УП–Д), замкнутой по скорости, представлены на рис. 8.6.

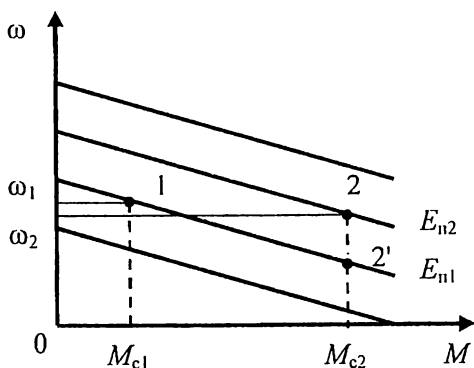


Рис. 8.6. Механические характеристики системы УП–Д, замкнутой по скорости

Рассмотрим работу системы. Пусть привод работает в точке 1, затем происходит увеличение нагрузки до M_{c2} . В разомкнутой системе этому изменению нагрузки соответствует точка 2'.

В замкнутой системе за счет снижения скорости произойдет увеличение входного сигнала преобразователя, что повлечет за собой возрастание напряжения преобразователя до величины E_{n2} , и затем переход в точку 2. Таким образом, жесткость характеристик увеличивается. При этом ω_2 должна быть меньше ω_1 , так как система работает по отклонению.

Выражения механических характеристик:
для разомкнутой системы:

$$\omega = \frac{K_n U_3}{C} - \frac{MR_\Sigma}{C^2}, \quad (8.1)$$

где $C = k\Phi$; K_n – коэффициент преобразователя;
для замкнутой системы:

$$\omega = \frac{K_n U'_3}{C \left(1 + \frac{K_n \gamma}{C} \right)} - \frac{MR_\Sigma}{C^2 \left(1 + \frac{K_n \gamma}{C} \right)} \quad (8.2)$$

Положим, что $\omega_{0p} = \omega_{03}$. Из этого равенства следует, что для получения одной и той же скорости ω_0 задающее напряжение в замкнутой схеме должно быть больше, т.е.

$$U'_3 = U_3 \left(1 + \frac{K_n \gamma}{C} \right). \quad (8.3)$$

При сравнении выражений для перепадов скоростей получаем, что перепад скорости в замкнутой системе уменьшается в $\left(1 + \frac{K_n \gamma}{C} \right)$ раз, т.е.

$$\Delta\omega_3 = \frac{\Delta\omega_p}{1 + \frac{K_n \gamma}{C}}. \quad (8.4)$$

8.4. Система УП–Д с нелинейной обратной связью по моменту

Во многих электроприводах, особенно при пуске двигателей, требуется ограничивать предельный момент. Эту задачу можно решить, снизив ЭДС преобразователя E_n при достижении моментом предельного значения. Для этого используется отрицательная обратная связь по моменту или по току, который пропорционален моменту при постоянстве потока. Замкнутая система регулирования с нелинейной обратной связью по моменту (по току) приведена на рис. 8.7.

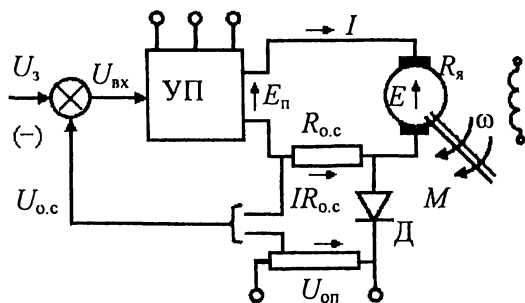


Рис. 8.7. Система УП–Д с нелинейной обратной связью по моменту $U_{o.c} = 0$ ($I < I_{пр}$),
 $U_{o.c} = \alpha I$ ($I \geq I_{пр}$)

Если ток меньше некоторого предельного значения $I_{пр}$, то сигнал обратной связи не подается, так как он не проходит через закрытый диод Д. Электропривод в этом случае является разомкнутым и имеет обычные механические характеристики с большой жесткостью. Если ток больше предельного значения $I_{пр}$, диод открывается, и сигнал обратной связи подается на вход преобразователя. При этом результирующий входной сигнал, определяемый как $U_{вх} = U_3 - U_{o.c} = U_3 - \alpha I$, уменьшится, что вызовет снижение ЭДС преобразователя E_n . Это приведет к снижению напряжения на двигателе и соответственно к уменьшению тока или момента двигателя. Характеристики становятся крутопадающими, в этом и проявляется эффект ограничения тока и соответственно момента. При большом коэффициенте

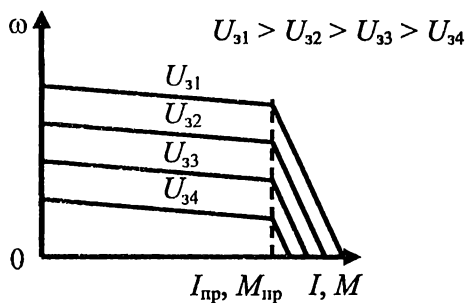


Рис. 8.8. Механическая характеристика системы УП–Д с нелинейной обратной связью по моменту

усиления системы крутопадающая часть механической характеристики электропривода приближается к вертикальной линии.

Механические характеристики замкнутой системы с нелинейной обратной связью по моменту приведены на рис. 8.8. Изменением величины U_3 можно установить требуемую скорость характеристики, а изменением $U_{оп}$ можно изменить или задать требуемую предельную величину момента $M_{пр}$ или тока $I_{пр}$.

8.5. Система, замкнутая по положению

Одним из видов замкнутых систем является система, замкнутая по положению, т.е. позиционная или следящая система электропривода.

Рассмотрим схему простейшей следящей системы, представленной на рис. 8.9. В этой системе вал двигателя связан с приемным потенциометром. Когда оба потенциометра установлены в нулевое положение, сигнал $U_\delta = 0$ и на выходе преобразователя также нулевое напряжение U . Если на задающем потенциометре установить некоторый входной угол $\theta_{вх}$, то на входе управляемого преобразователя появляется сигнал управления

$$U_\delta = K_{д.п} \delta, \quad (8.5)$$

а на выходе преобразователя – пропорциональное ему выходное напряжение

$$U = K_{д.п} K_{у.п} \delta = K_\Sigma \delta, \quad (8.6)$$

где $K_{д.п}$ – коэффициент передачи датчика положения; $K_{у.п}$ – коэффициент усиления преобразователя; K_Σ – общий коэффициент усиления; δ – погрешность позиционирования.

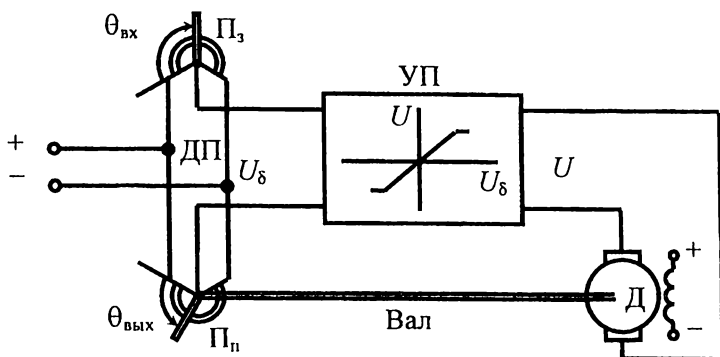


Рис. 8.9. Система, замкнутая по положению: ДП – датчик положения; ПЗ и Пп – потенциометры задающий и приемный; $\theta_{вх}$ и $\theta_{вых}$ – входной и выходной угол; $\delta = \theta_{вх} - \theta_{вых}$ – погрешность позиционирования; U_δ – сигнал управления; УП – управляемый преобразователь

Это напряжение подается на двигатель, который начнет перемещать подвижный контакт подвижного потенциометра, повернув его на угол $\theta_{вых}$.

Оценим погрешность позиционирования δ в конце перемещения при $\omega = 0$, когда момент двигателя принимает значение $M_{к.з}$. Исходя из уравнения движения, имеем

$$M_{к.з} - M_c = 0. \quad (8.7)$$

Учитывая, что $M_{к.з} = CI_{к.з} = \frac{CU}{R_\gamma}$, где постоянная $C = K\Phi$,

запишем уравнение движения в виде

$$\frac{CU}{R_\gamma} - M_c = 0. \quad (8.8)$$

Подставив вместо напряжения U его выражение через погрешность δ ($U = K_\Sigma \delta$) и разрешив уравнение относительно δ , получим

$$\delta = \frac{M_c R_\gamma}{CK_\Sigma}, \quad (8.9)$$

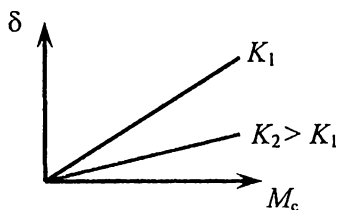


Рис. 8.10. Погрешности позиционирования ЭП, замкнутого по положению

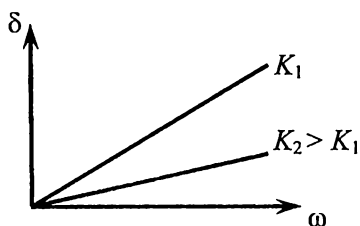


Рис. 8.11. Погрешности слежения ЭП, замкнутого по положению

т.е. погрешность позиционирования в линейной системе пропорциональна моменту нагрузки M_c и обратно пропорциональна коэффициенту усиления K_Σ (рис. 8.10).

В следящих системах очень важен показатель погрешности слежения в режиме заводки с постоянной скоростью. Следящие системы – это системы, работающие без нагрузки ($M_c = 0$). Системы имеют малый момент инерции, т.е. практически являются безынерционными ($J = 0$).

Из уравнения движения, пренебрегая моментом сопротивления ($M_c = 0$), имеем

$$M_{к.з} - \beta\omega = 0, \quad (8.10)$$

где β – жесткость механической характеристики.

Заменим $M_{к.з}$ его выражением через напряжение U и погрешность δ , тогда

$$\frac{CK_\Sigma\delta}{R_z} - \beta\omega = 0. \quad (8.11)$$

Откуда получим

$$\delta = \frac{\beta\omega R_z}{CK_\Sigma}, \quad (8.12)$$

т.е. погрешность слежения в следящей системе пропорциональна скорости ω и обратно пропорциональна коэффициенту усиления K_Σ (рис. 8.11).

8.6. Понятие о системах подчиненного регулирования

В замкнутых электроприводах часто требуется осуществлять регулирование нескольких координат. Для того чтобы иметь возможность независимого регулирования координаты, применяются схемы с подчиненным регулированием координат.

Структурная схема с подчиненным регулированием тока и скорости приведена на рис. 8.12. В этой схеме сигналы обратных связей $U_{o.c.c}$ и $U_{o.c.t}$ подаются на входы регуляторов скорости РС и тока РТ вместе с задающими сигналами $U_{з.с}$ и $U_{з.т}$. Сигнал ошибки U_{Δ} подается на вход управляемого преобразователя УП, который управляет двигателем М путем изменения напряжения U . Регулирование каждой координаты осуществляется своим регулятором тока РТ или скорости РС. Регуляторы вместе с обратными связями соответственно по току и скорости с коэффициентами обратных связей $K_{o.o.t}$ и $K_{o.o.c}$ образуют замкнутые контуры. Они располагаются таким образом, чтобы входным задающим сигналом для контура тока $U_{з.т}$ являлся выходной сигнал внешнего по отношению к нему контура скорости. Таким образом, внутренний контур тока будет подчинен внешнему контуру скорости – основной регулируемой координате ЭП.

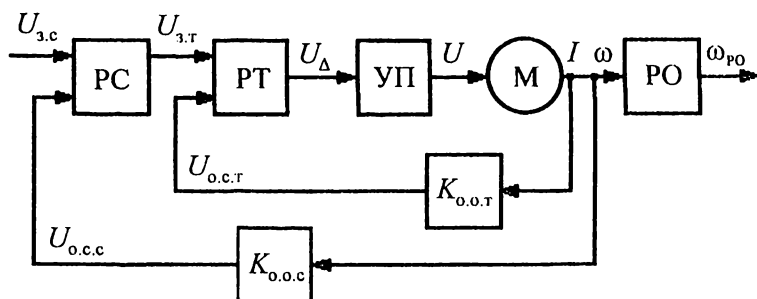


Рис. 8.12. Схема электропривода с подчиненным регулированием тока и скорости

Основное достоинство схемы с подчиненным регулированием координат состоит в возможности оптимальной настройки регулирования каждой координаты, поэтому эта схема нашла широкое применение в замкнутом электроприводе. Кроме того,

подчинение контура тока контуру скорости позволяет упростить процесс ограничения тока и момента, для чего необходимо лишь поддерживать на соответствующем уровне сигнал на выходе регулятора скорости (сигнал задания уровня тока).

Для регулирования положения рабочего органа механизма в схему вводится обратная связь по положению и регулятор положения.

Стандартными настройками контуров регулирования в схемах подчиненного регулирования приняты настройки на модульный (технический) и симметричный оптимумы.

При настройке контуров регулирования на модульный оптимум перерегулирование выходной величины при скачке напряжения задания и нулевых начальных условиях не превышает 4,3 % установившегося значения выходного сигнала, а время первого достижения установившегося значения $t_p = 4,7T_\mu$, где T_μ – суммарная некомпенсированная постоянная времени внутреннего контура регулирования тока.

При настройке на симметричный оптимум перерегулирование в переходном режиме увеличивается до 56 % установившегося значения выходного сигнала, а время первого его достижения уменьшается до $t_p = 3,1T_\mu$.

Глава 9

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

9.1. Принципы управления, используемые в релейно-контакторных схемах управления

Системой управления электроприводом называется комплекс аппаратных средств, реализующих алгоритмы включения, выключения и защиты каждого электропривода и взаимодействие комплекса электроприводов при выполнении сложных технологических процессов. Системы управления электроприводами строятся с использованием релейно-контакторной аппаратуры и программируемых контроллеров.

Для включения и отключения силовых цепей электропривода используются мощные электромагнитные контакторы или тиристорные коммутаторы.

Логические функции управления электроприводом реализуются с помощью электромагнитных и других типов реле, контакты которых имеют ограниченную коммутационную способность, составляющую обычно не более 5 А. В современных системах электроприводов с дискретным управлением часто логические функции реализуются на программируемых контроллерах с выходом на катушки контакторов.

Управление процессами пуска, реверса и торможения в релеино-контакторных схемах осуществляется в функции времени, скорости, тока или пути. Выбор принципа управления зависит от технологических требований и простоты реализации.

Управление в функции времени выполняется с использованием реле времени. Чаще всего используются электромагнитные реле времени постоянного тока. Эти реле включаются практически мгновенно, а отключаются с выдержкой времени до 15 с. Для получения более продолжительных выдержек времени используют электропневматическое реле.

Для управления в функции скорости используется электро-механическое реле контроля скорости (РКС), устанавливаемое на валу двигателя. Контакты этого реле замыкаются в зависимости от величины скорости и направления вращения. В схемах с реостатным пуском, реверсом и торможением в качестве реле контроля скорости используются электромагнитные реле напряжения, включаемые на напряжение якоря или ротора.

Управление в функции тока выполняется с использованием реле максимального или минимального тока, включаемых в силовую цепь.

Управление в функции пути реализуется с использованием контактных или бесконтактных путевых выключателей, которые срабатывают при достижении механизмом заданного положения.

9.2. Защита в системах электропривода

Защита асинхронных электроприводов.

Нулевая защита отключает электропривод при недопустимом снижении питающего напряжения.

Максимально-токовая защита от коротких замыканий отключает электропривод при коротких замыканиях в силовых

целях и цепях управления. Она предотвращает развитие аварии в поврежденном участке схемы и защищает питающую электропривод линию.

Максимально-токовая защита от кратковременных перегрузок действует на отключение, применяется в асинхронных электроприводах с двигателем с фазным ротором. Она защищает щеточный узел ротора от работы с кратковременными недопустимо большими токами. Ток срабатывания этой защиты принимается равным $(2,5-3)I_n$. Максимальные пусковые токи должны быть ниже тока срабатывания этой защиты.

Тепловая защита действует на отключение и защищает двигатель от перегрева при перегрузках за счет нарушения технологического процесса или при работе двигателя на двух фазах.

Защита синхронных электроприводов.

Максимально-токовая защита защищает от коротких замыканий в силовой цепи.

Нулевая защита, если по технологии работы не оговаривается режим самозапуска при кратковременном исчезновении питающего напряжения.

Минимально-токовая защита в цепи обмотки возбуждения защищает синхронный двигатель от продолжительной работы в асинхронном режиме.

Защита от затянувшегося пуска реализуется с помощью реле времени, защищает двигатель от недопустимого нагрева при асинхронном пуске. Если двигатель за отведенное время не вышел на рабочую характеристику синхронного режима, то пуск двигателя прекращается, и он отключается от питающей сети.

Защита электроприводов постоянного тока.

Нулевая защита предотвращает самозапуск электропривода при кратковременном исчезновении питающего напряжения.

Максимально-токовая защита защищает от коротких замыканий в силовой цепи.

Максимально-токовая защита ограничивает величину тока якоря по условиям коммутации щеточно-коллекторного узла; в замкнутых системах регулирования эта защита выполняется с помощью схем токоограничения.

Минимально-токовая защита в цепи обмотки независимого возбуждения отключает электропривод и предотвращает его

работу с недопустимо высокими скоростями при ослабленном магнитном потоке и небольших нагрузках на валу.

Защита от перенапряжения в обмотке возбуждения при отключении схемы реализуется включением разрядного сопротивления $R_p = (2-4)R_{0,в}$ параллельно обмотке возбуждения.

9.3. Выбор силовых аппаратов управления

Автоматический выключатель выбирается по роду тока коммутируемых цепей; по числу коммутируемых цепей – одна, две или три; по номинальному току контактов $I_n \geq I_{нагр}$; по типу используемого чувствительного размыкающего элемента – электромагнитный максимально-токовый расцепитель, тепловой расцепитель либо и тот и другой одновременно. Ток срабатывания электромагнитного расцепителя $I_{ср} = (11-14)I_n$, так как он должен срабатывать при коротких замыканиях в защищаемой цепи и не должен срабатывать во время переходных процессов пуска, реверса и торможения.

Ток срабатывания теплового расцепителя автоматического выключателя устанавливается в пределах $(0,9-1,2)I_n$ автомата.

Контакторы выбираются по роду коммутируемого тока; по номинальному напряжению; по номинальному току силовых контактов $I_n \geq I_{н.нагр}$; по числу силовых контактов – один, два или три; по числу и типу вспомогательных контактов; по роду тока катушки управления – постоянного или переменного тока; по номинальному напряжению катушки.

Тепловые реле выбираются по номинальному току – $I_n \approx I_{н.дв.}$

Предохранители для цепей управления выбирают по максимальному току цепи управления – $I_{н.пр} \approx (1,2-1,3)I_{упр.м.}$. Максимальный ток $I_{упр.м.}$ зависит от максимального числа одновременно включенных в схеме катушек контакторов и реле.

9.4. Типовые схемы управления асинхронными электроприводами

Одна из типовых схем управления пуском неререверсивного электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором приведена на рис. 9.1. Схема содержит следующие аппараты:

QF – автоматический выключатель (автомат) с максималь-
но-токовым расцепителем;

KM – контактор или пускатель;

FR1 и FR2 – тепловые реле;

FU1 и FU2 – предохранители;

SB-П и SB-C – кнопки пуска и останова электропривода.

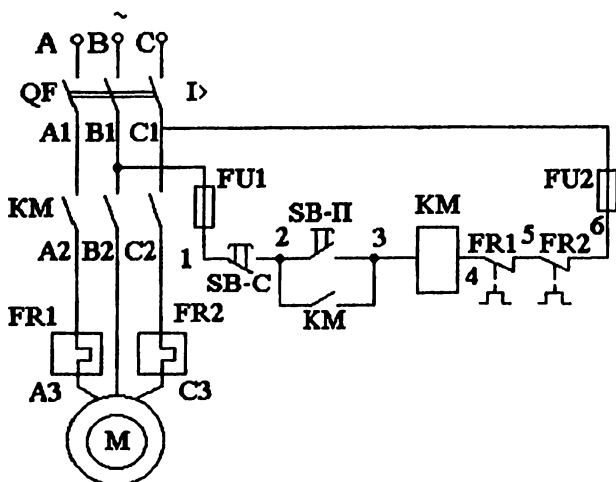


Рис. 9.1. Схема управления нереверсивным асин-
хронным электроприводом

В исходном положении схемы автомат QF включен. Пуск электропривода осуществляется нажатием кнопки SB-П. При этом подается питание на катушку контактора KM, он включается и замыкает свои силовые контакты, подключая статорную обмотку к питающей сети. Одновременно контактор KM замыкает свой вспомогательный контакт, включенный параллельно кнопке SB-П, и становится на самопитание.

Для останова электропривода нажимают кнопку SB-C, катушка KM теряет питание и контактор отключает статорную цепь от сети. Схема возвращается в исходное состояние. Электропривод останавливается под действием статического момента сопротивления.

В схеме имеются следующие защиты:

1) *нулевая защита* реализуется контактором КМ. При кратковременном исчезновении питающего напряжения или значительном его снижении контактор КМ отключается, и схема возвращается в исходное состояние;

2) *максимально-токовая защита в силовых цепях* выполняется автоматом QF за счет использования в нем максимально-токового расцепителя с уставкой $I_{ср} = (11-14)I_{н.}$. При возникновении короткого замыкания в силовой цепи срабатывает максимально-токовый расцепитель и автомат отключает электропривод в целом;

3) *максимально-токовая защита в цепях управления* осуществляется предохранителями FU1 и FU2, номинальный ток которых $I_{н.пр} \approx (1,2-1,3)I_{упр.м.}$

4) *тепловая защита двигателя* выполняется тепловыми реле FR1, FR2, размыкающие контакты которых включены в цепь катушки контактора КМ. При срабатывании одного из тепловых реле контактор КМ отключается, и схема возвращается в исходное состояние. Повторно она может быть включена после остывания теплового реле и двигателя.

Часто требуется, чтобы процесс остановки электропривода протекал интенсивнее, чем только под действием статического момента. В этом случае в схемах управления используют различные виды электрического торможения – динамическое торможение и торможение противовключением, а также механическое торможение с помощью электромагнитных тормозов.

На рис. 9.2 приведена принципиальная схема нереверсивного асинхронного электропривода, которая позволяет производить пуск и остановку электродвигателя с динамическим торможением.

Питание на схему подается автоматическим выключателем QF, напряжение переменного тока на обмотку статора – линейным контактором КМ, напряжение постоянного тока – контактором динамического торможения КТ. Источник постоянного тока содержит трансформатор ТС и выпрямитель V1, подключаемые к сети контактором КТ только в режиме торможения.

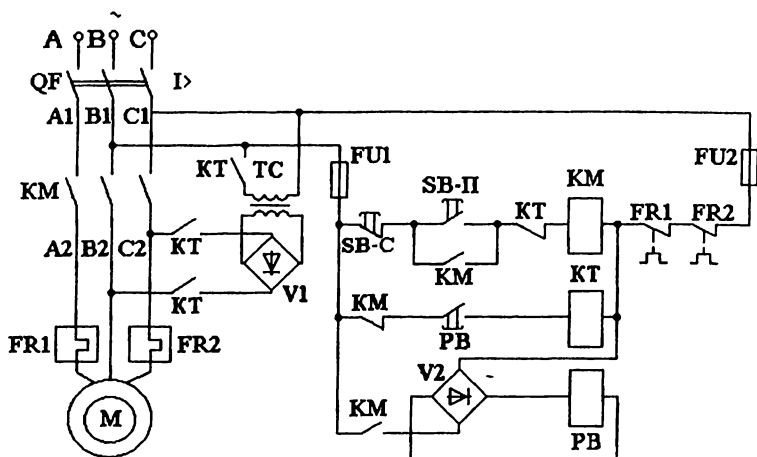


Рис. 9.2. Схема управления нереверсивным асинхронным электроприводом с динамическим торможением

Команда на пуск подается кнопкой SB-П. При ее нажатии включается контактор KM, и двигатель подключается к сети. Одновременно замыкается цепь реле времени RB, оно срабатывает и подготавливает цепь питания контактора торможения KT. Для остановки двигателя нажимают кнопку SB-С, контактор KM отпускает и отключает двигатель от сети переменного тока. Одновременно нормально закрытым блок-контактом KM включается контактор KT, подающий в обмотки статора двигателя постоянный ток. Двигатель переходит в режим динамического торможения. Длительность подачи постоянного тока в обмотки статора контролируется реле времени RB. После отключения катушки RB его контакт в цепи контактора KT размыкается с выдержкой времени.

В схеме применены нулевая, максимально-токовая и тепловая защиты, осуществляемая соответственно линейным контактором KM, автоматическим выключателем QF с максимально-токовым расцепителем и токовыми реле FR1 и FR2. Схема управления защищена предохранителями FU1 и FU2. При срабатывании любой из защит отключается линейный контактор KM. В схеме используется типовая блокировка с помощью

размыкающих контактов КМ и КТ, включенных перекрестно в цепи катушек этих контакторов, которая запрещает одновременное срабатывание контакторов КМ и КТ.

Когда по условиям технологического процесса необходимо значительно ускорить процесс торможения, то применяют торможение противовключением. Схема реверсивного асинхронного электропривода, в которой реализуется торможение противовключением, приведена на рис. 9.3. Схема позволяет осуществлять прямой пуск, реверс и остановку электропривода торможением противовключением с контролем по скорости. При этом в качестве чувствительного элемента используется электромеханическое реле контроля скорости SR, устанавливаемое на валу электродвигателя. Оно замыкает свои контакты SR(B) или SR(H) при скорости $\omega_{SR} \geq 0,01\omega_{н.дв.}$.

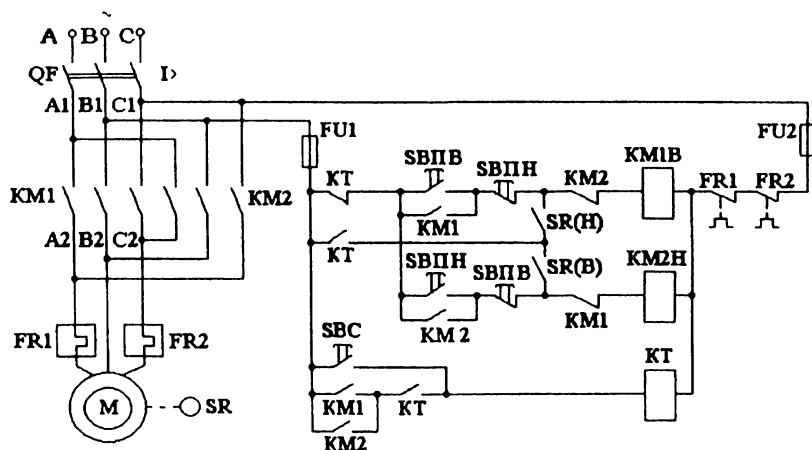


Рис. 9.3. Схема реверсивного асинхронного электропривода с торможением противовключением

Управление приводом осуществляется кнопками пуска SBПВ (вперед), SBПН (назад) и кнопкой остановки SBC (стоп) в зависимости от требуемого по технологии направления вращения. Напряжение на обмотку статора подается контакторами KM1B – чередование фаз ABC, и KM2H – чередование фаз CBA. Кнопка SBC включена в цепь катушки реле торможения КТ,

которое организует режим торможения противовключением при любом направлении вращения. В цепях катушек контакторов КМ1В и КМ2Н находятся блокировочные контакты кнопок и контакторов SBПН, КМ2 и SBПВ, КМ1, предотвращающие одновременное срабатывание этих контакторов.

Управление электроприводом осуществляется следующим образом. При нажатии кнопки пуска SBПВ образуется цепь питания катушки КМ1В, контактор КМ1В срабатывает и подключает статорную обмотку асинхронного электродвигателя к питающей сети.

При срабатывании контактора КМ1В замыкается контакт КМ1, шунтирующий кнопку SBПВ, и контактор становится на самопитание. Одновременно в цепи катушки КМ2Н размыкается блокировочный контакт КМ1, а в цепи катушки реле торможения КТ замыкается контакт КМ1. При разгоне электродвигателя срабатывает реле контроля скорости и замыкает свой контакт SR(B), подготавливая схему к остановке электропривода, если будет нажата кнопка SBC (стоп).

Для реверсирования электропривода нужно нажать кнопку SBПН. После этого размыкается блокирующий контакт SBПН в цепи катушки КМ1В. Контактор КМ1В отключает статор двигателя от питающей сети. Одновременно в цепи катушки КМ2Н замыкается блокирующий контакт КМ1. Катушка КМ2Н получает питание, и контактор КМ2Н подключает статорную обмотку к питающей сети, изменив чередование фаз. Магнитное поле электродвигателя начинает вращаться в противоположном направлении, а ротор по инерции вращается в прежнем направлении. Поэтому асинхронный двигатель переходит в режим торможения противовключением до полной остановки, а затем разгоняется в направлении назад. При разгоне назад реле контроля скорости замыкает свой контакт SR(H), подготавливая схему к остановке. Одновременно контактор КМ2В замыкает контакты КМ2 в цепи катушки реле торможения КТ.

Для остановки привода нажимается кнопка SBC. При нажатии кнопки SBC катушка реле торможения КТ получает питание, реле КТ срабатывает, размыкая контакт КТ в цепи питания катушки контактора КМ2Н и замыкая контакт КТ в цепи питания катушки КМ1В. Контактор КМ2Н теряет питание и отклю-

чает статорную обмотку от питающей сети. При этом контактор КМ2Н замыкает свой блокировочный контакт КМ2 в цепи катушки КМ1В. Контактор КМ1В срабатывает, так как катушка КМ1В получает питание по цепи КТ, SR(H), КМ2. Статорная обмотка подключается прямым чередованием фаз для вращения вперед, а ротор вращается по инерции в направлении назад. Поэтому асинхронный двигатель переходит в режим торможения противовключением. Когда скорость снизится практически до нуля, реле контроля скорости SR разомкнет свой контакт SR(H), катушка КМ1В потеряет питание, и контактор КМ1В отключит статорную обмотку от питающей сети.

Глава 10

ВЫБОР ТИПА И МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

При выборе мощности приводного двигателя решается комплекс вопросов:

- расчет мощности двигателя;
- выбор номинальной скорости вращения;
- выбор двигателя в соответствии с режимом его работы по условиям нагрузки;
- выбор двигателя по условиям пуска;
- выбор степени защиты оболочки двигателя;
- выбор конструктивного исполнения по условиям окружающей среды;
- выбор системы охлаждения.

10.1. Выбор типа двигателя

Выбор двигателя начинают с самых простых – асинхронных двигателей, далее рассматривают синхронные двигатели, а затем двигатели постоянного тока.

В том случае, когда нагрузка неизменная и не требуется регулирования скорости, рекомендуется применять синхронные двигатели. Их габариты меньше и работа экономичнее, чем у асинхронных двигателей той же мощности.

При частых пусках и непостоянной нагрузке наиболее надежным в эксплуатации и дешевым электроприводом является

электропривод на базе короткозамкнутого асинхронного двигателя.

Асинхронные двигатели с фазным ротором применяются обычно там, где требуются особые требования к пусковому моменту и току при ограниченной мощности подстанции.

В регулируемых электроприводах, благодаря внедрению силовых управляемых преобразователей напряжения (частотный преобразователь) в настоящее время на смену ДПТ приходит электропривод на базе синхронных и асинхронных двигателей. ДПТ находит применение в основном в металлургии и металлообрабатывающей промышленности.

При выборе двигателя для электропривода необходимо учитывать защиту среды от искрообразования в машине, а также защиту самих двигателей от попадания в них различных примесей из окружающей среды.

По степени защищенности различают несколько типов исполнения машин:

- двигатель открытого исполнения;
- двигатель, защищенный от попадания капель дождя, посторонних частиц; такой двигатель может быть установлен на открытом воздухе;
- двигатель закрытого исполнения, используемый в запыленных помещениях и в помещениях с парами;
- специальные взрывозащищенные двигатели.

По способу охлаждения электрические двигатели делятся на следующие типы:

- двигатели с естественным охлаждением;
- двигатели с самовентиляцией;
- двигатели с независимой вентиляцией.

Асинхронные короткозамкнутые двигатели имеют ряд исполнений:

- нормальное с $s_n \leq 2,5 \%$ и пусковым моментом $M_n = (0,9 - 1,2) M_n$;
- с повышенным пусковым моментом $s_n \leq 10 \%$, $M_n = (1,8 - 2) M_n$;
- с повышенным скольжением $s_n \leq 12 \%$, $M_n = (1,8 - 2) M_n$.

Габариты и масса двигателя зависят от номинального момента, а не от номинальной мощности. Поэтому двигатели оди-

наковой мощности имеют меньшие массогабаритные показатели при большей скорости, чем при меньшей скорости.

10.2. Расчет электродвигателя на нагрев

В расчет мощности двигателя входит проверка его на нагрев и на перегрузочную способность. Нагрев двигателя сверх допустимого значения приводит к старению изоляции и выходу двигателя из строя. Двигатели имеют следующие классы изоляции:

Параметры (при $t_{\text{окр.ср}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Класс изоляции			
	Е	В	F	Н
Допустимая температура нагрева изоляции	120	135	155	180
Допустимая температура нагрева обмотки	—	120	140	165
Допустимое превышение температуры	75	80	100	125

Расчет двигателя на нагрев производится исходя из уравнения теплового баланса

$$\Delta P \cdot dt = A \cdot \tau \cdot d\tau + C \cdot d\tau, \quad (10.1)$$

где ΔP – суммарные потери мощности в двигателе (Вт); A – коэффициент теплоотдачи двигателя – количество тепла, отдаваемое двигателем в окружающую среду за одну секунду при разности температур двигателя и окружающей среды в $1\text{ }^{\circ}\text{C}$; τ – превышение температуры двигателя относительно температуры окружающей среды; C – теплоемкость двигателя – количество тепла, необходимое для нагрева двигателя на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Уравнение теплового баланса можно записать в виде неоднородного дифференциального уравнения

$$T_n \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{\text{уст}}, \quad (10.2)$$

где $T_{\text{н}}$ – постоянная времени нагрева двигателя $T_{\text{н}} = \frac{C}{A}$; $\tau_{\text{уст}}$ – установившееся превышение температуры двигателя $\tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{A}$

Решение уравнения имеет вид

$$\tau = (\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}} + \tau_{\text{уст}}, \quad (10.3)$$

где $\tau_{\text{нач}}$ – начальное превышение температуры двигателя относительно температуры окружающей среды.

При $\tau_{\text{нач}} = 0$ решение уравнения нагрева принимает вид

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}} \right). \quad (10.4)$$

Процесс охлаждения двигателя с температуры превышения $\tau_{\text{нач}}$ до температуры окружающей среды описывается выражением

$$\tau = \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (10.5)$$

где T_0 – постоянная времени охлаждения двигателя, $T_0 = \frac{C}{A_0}$;

A_0 – коэффициент теплоотдачи двигателя при охлаждении.

Процесс нагрева и охлаждения двигателя представлен на рис. 10.1.

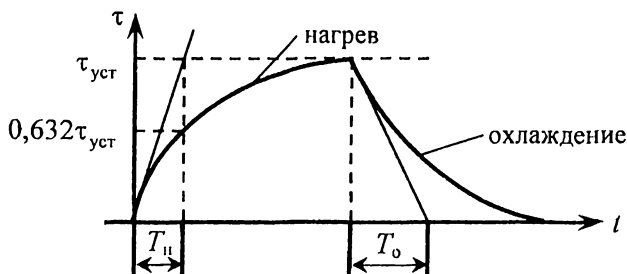


Рис. 10.1. Процесс нагрева и охлаждения двигателя

Так как превышение температуры пропорционально потерям, то номинальные потери определяют допустимое превышение температуры

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{\Delta P_{\text{н}}}{A} \quad (10.6)$$

Если потери двигателя меньше номинальных потерь, то нагрев его не превысит допустимого значения. Поэтому проверка двигателя на нагрев проводится по условию

$$\tau_{\text{max}} \leq \tau_{\text{доп}} \quad (10.7)$$

Данная проверка на нагрев может осуществляться прямым и косвенным методом.

Прямой метод предусматривает построение кривой нагрева, определение по ней τ_{max} , и непосредственную проверку по условию $\tau_{\text{max}} \leq \tau_{\text{доп}}$. Прямой метод достаточно трудоемок, поэтому на практике проверку двигателя на нагрев обычно осуществляют косвенными методами: методом средних потерь и методами эквивалентных величин.

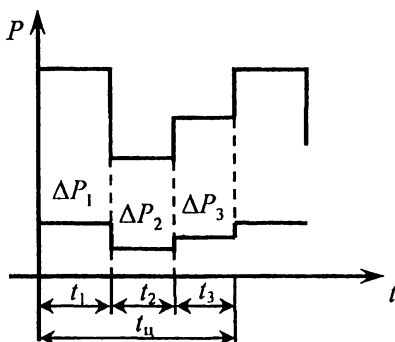


Рис. 10.2. Нагрузочная диаграмма двигателя и диаграмма потерь мощности при изменяющейся нагрузке

Метод средних потерь. Является наиболее точным методом определения нагрева двигателя. Сущность метода состоит в определении средних потерь мощности за цикл работы и сопоставление их с номинальными потерями. Для определения средних потерь необходимо знать зависимость КПД двигателя от нагрузки. Зная эту зависимость, по известной нагрузочной диаграмме двигателя, представленной на рис. 10.2, можно определить его потери.

Потери мощности определяются на каждом временном отрезке цикла

$$\Delta P_i = P_i \cdot \frac{1 - \eta_i}{\eta_i} \quad (10.8)$$

Затем определяются средние потери

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3}{t_1 + t_2 + t_3} \quad (10.9)$$

Условие проверки по средним потерям: $\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{н}}$.

Метод эквивалентного тока. Используется в том случае, когда известен график изменения тока во времени. Потери в двигателе пропорциональны квадрату тока в обмотках. Зная график тока в течение цикла работы, можно определить эквивалентный ток. Эквивалентный ток I_3 – это такой неизменный по величине ток, который вызывает такой же нагрев двигателя, что и реальный ток, изменяющийся в соответствии с нагрузочной диаграммой:

$$I_3 = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad (10.10)$$

Условие проверки по эквивалентному току: $I_3 \leq I_{\text{н}}$.

Метод эквивалентного момента. Используется в том случае, когда известен график изменения момента во времени. Если принять, что момент двигателя пропорционален току, то можно воспользоваться методом эквивалентного момента. Эквивалентный момент M_3 – это такой постоянный по величине момент нагрузки, который вызывает такой же нагрев двигателя, что и реальный момент, изменяющийся в соответствии с графиком нагрузки:

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad (10.11)$$

Условие проверки по эквивалентному моменту: $M_3 \leq M_{\text{н}}$.

Метод эквивалентной мощности. Используется в том случае, когда известен график изменения мощности во времени. Если принять, что при постоянной скорости двигателя или при ее незначительном изменении от нагрузки мощность пропорциональна моменту ($P = M\omega$), то можно применить метод эквивалентной мощности. Эквивалентная мощность P_3 – это такая постоянная по величине мощность нагрузки, которая вызывает такой же нагрев двигателя, что и реальная мощность, изменяющаяся в соответствии с графиком работы механизма:

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad (10.12)$$

Условие проверки по эквивалентной мощности: $P_3 \leq P_{II}$

10.3. Нагрузочная диаграмма и тахограмма

Основой для выбора электропривода при расчетах мощности двигателя является нагрузочная диаграмма и тахограмма (рис. 10.3)

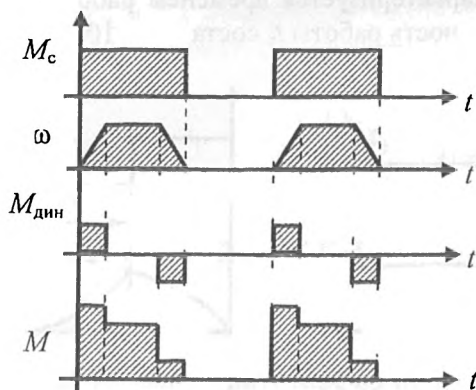


Рис. 10.3. Нагрузочные диаграммы и тахограмма двигателя и механизма: M – момент двигателя, $M = M_{дин} + M_c$, M_c – момент механизма; $M_{дин}$ – динамический момент; ω – скорость привода

Нагрузочная диаграмма – это зависимость мощности P , момента M или тока I от времени, а тахограмма – это зависимость скорости ω от времени. Нагрузочные диаграммы и тахограммы есть и для механизма, и для двигателя.

10.4. Классификация номинальных режимов работы двигателя

В зависимости от нагрузочной диаграммы различают восемь режимов работы двигателя (S1 – S8). Основные режимы работы – это режимы S1, S2 и S3.

Режим работы S1 – это продолжительный режим работы, при котором превышение температуры τ двигателя достигает установившегося значения (рис. 10.4).

Режим работы S2 – это кратковременный режим, в котором периоды нагрузки чередуются с периодами отключения. При этом за время работы t_p двигателя превышение температуры τ не достигает установившегося значения, а за время отключения t_o все части двигателя охлаждаются до температуры окружающей среды (рис. 10.5).

Режим S2 характеризуется временем работы t_p . Стандартная продолжительность работы t_p составляет 10, 30, 60 и 90 мин.

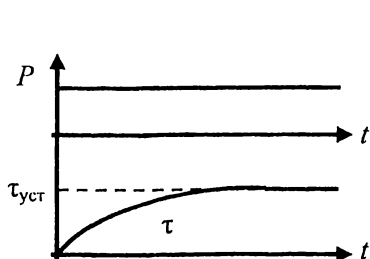


Рис. 10.4. Нагрузочная диаграмма и график изменения превышения температуры двигателя при продолжительном режиме работы S1

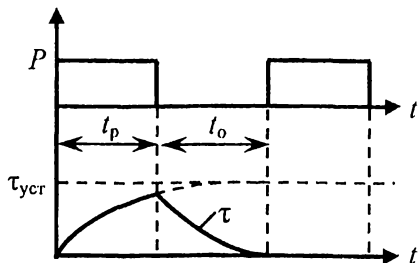


Рис. 10.5. Диаграммы изменения нагрузки и превышения температуры двигателя при кратковременном режиме работы S2

Режим S3 – это повторно-кратковременный номинальный режим, при котором периоды нагрузки чередуются с периодами отключения. При этом за время работы t_p превышение температуры τ двигателя не достигает установившегося значения, а за время отключения t_o двигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды (рис. 10.6).

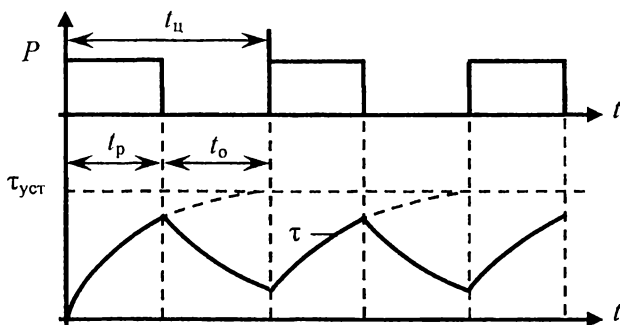


Рис. 10.6. Диаграммы изменения нагрузки и превышения температуры двигателя при повторно-кратковременном режиме работы S3 ($t_{\text{ц}}$ – время цикла)

Режим S3 характеризуется продолжительностью включения ПВ, %:

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_o} \cdot 100 \% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} \cdot 100 \% \quad (10.13)$$

Стандартные значения ПВ составляют 15, 25, 40 и 60 %, при этом продолжительность цикла $t_{\text{ц}}$ не должна превышать 10 мин.

10.5. Выбор двигателя по мощности в режиме S1

Если мощность нагрузки на валу двигателя P постоянна, то условие выбора

$$P_{\text{н}} \geq P. \quad (10.14)$$

Если мощность двигателя меняется в течение работы, то определяется эквивалентная мощность $P_э$, затем из каталога выбирается ближайшая номинальная мощность двигателя из условия

$$P_n \geq K_3 P_э, \quad (10.15)$$

где K_3 – коэффициент запаса, $K_3 = 1,05 \dots 1,2$.

При необходимости двигатель проверяется на перегрузочную способность по условиям пуска:

$$M_k = K_3(M_c + M_{дин}). \quad (10.16)$$

10.6. Выбор двигателя по мощности в режиме S2

Определяется мощность нагрузки и время работы двигателя. Если нагрузка за время работы меняется, то определяется эквивалентная мощность. Если время работы совпадает со стандартным значением, то двигатель выбирается из специального каталога по условию

$$P_n \geq P_э. \quad (10.17)$$

Если время работы не совпадает со стандартным значением, то рассчитывается стандартная эквивалентная мощность:

$$P_{э,ст} = P_э \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}}{1 - (a+1)e^{-\frac{t_{ст}}{T_n}} + ae^{-\frac{t_p}{T_n}}}}, \quad (10.18)$$

где t_p и $t_{ст}$ – расчетное и стандартное время работы; T_n – постоянная времени нагрева; a – отношение постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке, $a = \Delta P_c / \Delta P_{v,n}$, где ΔP_c – постоянные потери, $\Delta P_c = P_n(1 - \eta_n) / \eta_n - \Delta P_{v,n}$; $\Delta P_{v,n}$ – переменные потери при номинальной нагрузке, $\Delta P_{v,n} = I_n^2 R$; сопро-

тивления R принимаются: для двигателей с независимым возбуждением $R = R_{\text{я}} + R_{\text{доп}}$; для двигателей с последовательным возбуждением $R = R_{\text{я}} + R_{\text{доп}} + R_{\text{ов}}$; для асинхронных двигателей $R = 3(R_1 + R'_2)$, для синхронных двигателей $R = 3R_1$.

Затем выбирается мощность двигателя по условию (10.17).

Короткозамкнутый асинхронный двигатель проверяется по пусковому моменту и перегрузочной способности:

$$M_{\text{п}} \geq 1,2 M_{\text{с max}}; \quad M_{\text{к}} \geq M_{\text{с max}}, \quad (10.19)$$

где $M_{\text{с max}}$ – максимальный статический момент.

10.7. Выбор двигателя по мощности в режиме S3

При постоянной нагрузке и неизменяющемся времени работы и паузы, когда продолжительность включения равна стандартной величине, двигатель выбирается по специальному каталогу из условия

$$P_{\text{н}} \geq P. \quad (10.20)$$

Если нагрузка меняется, то выбор двигателя производится в следующем порядке:

- определяются мощность, время работы и паузы каждой операции в цикле;
- строятся нагрузочная диаграмма и тахограмма;
- определяется эквивалентная расчетная мощность $P_{\Sigma, \text{р}}$;
- определяется реальная продолжительность включения $\text{ПВ}_{\text{р}}$, %:

$$\text{ПВ}_{\text{р}} = \frac{\sum t_{\text{р}}}{\sum t_{\text{р}} + \sum t_{\text{о}}} \cdot 100 \%, \quad (10.21)$$

где $\sum t_{\text{р}}$ и $\sum t_{\text{о}}$ – суммарное время работы и паузы.

Если реальная продолжительность включения $\text{ПВ}_{\text{р}}$ равна стандартному значению $\text{ПВ}_{\text{ст}}$, то мощность двигателя выбирается по специальному каталогу из условия

$$P_{\text{н}} \geq K_{\Sigma} P_{\Sigma, \text{р}}, \quad (10.22)$$

где коэффициент запаса K_{Σ} , равный 1,1–1,5, зависит от частоты включения и отношения моментов инерции привода и двигателя.

Если $PВ_p$ не соответствует стандартному значению, то эквивалентная мощность приводится к стандартной мощности по выражению

$$P_{э.ст} = P_{э.р} \sqrt{\frac{PВ_p}{PВ_{ст}}}, \quad (10.23)$$

а затем мощность двигателя выбирается исходя из условия

$$P_{н} \geq K_3 P_{э.ст}. \quad (10.24)$$

Таким же образом рассчитывается эквивалентный стандартный момент

$$M_{э.ст} = M_{э.р} \sqrt{\frac{PВ_p}{PВ_{ст}}} \quad (10.25)$$

Если двигатель выбирается по моменту, то условие выбора

$$M_{н} \geq K_3 M_{э.ст}. \quad (10.26)$$

10.8. Выбор резисторов в силовых цепях двигателей

Резисторы в силовых цепях двигателей применяются для регулирования их скорости и для ограничения тока и момента при пуске, реверсе и торможении.

Выбор резисторов производится по двум основным параметрам – сопротивлению и току. Сопротивление резистора должно равняться расчетному значению, а номинальный ток резистора должен соответствовать рабочему току двигателя. Это обеспечит нормативный нагрев резисторов. Подбор сопротивления резисторов осуществляется за счет последовательного, параллельного и смешанного соединения отдельных элементов в секции.

Для проверки резисторов по нагреву применяется метод эквивалентного тока. Если расчетный эквивалентный ток не превышает номинальный ток резистора, то он может работать в таком режиме сколь угодно долго.

Для *продолжительного режима* работы проверка резистора по нагреву выполняется путем сопоставления по формуле (10.10) его эквивалентного рабочего тока с номинальным значением тока резистора. Выполнение условия $I_3 \leq I_n$ свидетельствует о нормальном тепловом режиме резистора.

В *кратковременном и повторно-кратковременном режиме* работы расчет эквивалентных токов производится с помощью расчетных коэффициентов, зависящих от времени работы резистора и его постоянной времени нагрева. Эти коэффициенты определяются по зависимостям, приведенным в специальной справочной литературе.

Порядок проверки выбранного резистора по нагреву:

- с помощью графика работы двигателя определяются эквивалентный ток I_3 , протекающий по резистору, время его протекания t_p для кратковременного режима работы и продолжительность включения ПВ_p для повторно-кратковременного режима работы;

- для найденных значений t_p или ПВ_p и по постоянной нагрева T_n резистора по зависимостям, приводимым в специальной справочной литературе, находятся коэффициенты K_k и $K_{пв}$;

- определяется расчетный ток резистора $I_{расч} = I_3 / K_k$ или $I_{расч} = I_3 / K_{пв}$.

Условие выбора резистора по нагреву

$$I_n \geq I_{расч}. \quad (10.27)$$

Применяемые в электроприводе резисторы выполняются в виде ящиков сопротивлений из нихромовой, фехральной или константановой проволоки или ленты, намотанной на изолятор, или из чугунных элементов.

Ящики НФ11А выполнены из проволочных фехральных элементов, а НК1А – из константановых элементов. Ящики имеют 19 исполнений с сопротивлениями секций от 0,7 до 96 Ом на длительные токи от 19 до 1,7 А. Допустимый перегрев для фехральных элементов составляет 350 °С, а для константановых элементов – 250 °С.

Ящики НФ1А с ленточными фехральными элементами имеют 11 исполнений с сопротивлениями секций от 0,078 до 1,38 Ом на длительные токи от 107 до 24 А.

Ящики резисторов с чугунными элементами имеют мощность до нескольких тысяч киловатт. Например, ящики типа ЯС100 состоят из 20 элементов НС400 с сопротивлением каждого элемента от 0,005 до 0,11 Ом на токи соответственно от 215 до 46 А.

В настоящее время промышленностью вместо ящиков сопротивлений типа НФ1А выпускаются блоки с фехралевыми и константановыми проволоочными и ленточными элементами типа БФ6 и БК12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для вузов / Н.Ф. Ильинский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2003.

2. Москаленко В.В. Электрический привод: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В.В. Москаленко. – М.: Мастерство; Высшая школа, 2006.

3. Беспалов В.Я. Электрические машины: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Костеленец. – М.: Академия, 2006.

4. Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 4. Использование электрической энергии / под ред. А.И. Попова. – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.

5. Ковчин С.А. Основы электропривода: учеб. пособие для вузов / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	3
1.1. Понятие «электропривод»	3
1.2. Классификация электроприводов	5
1.3. Энергетические диаграммы режимов работы электроприводов.....	6
1.4. Регулирование координат электропривода.....	10
1.5. Структура электроприводов при регулировании координат	15
Глава 2. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА	17
2.1. Основные законы механики электропривода	17
2.2. Уравнение движения электропривода.....	19
2.3. Приведение моментов инерции и моментов сопротивления	20
2.4. Установившееся движение привода и его устойчивость.....	22
2.5. Переходный механический режим электропривода при постоянном динамическом моменте	25
2.6. Переходный механический процесс электропривода при динамическом моменте, линейно зависящем от скорости	26
2.7. Переходный механический процесс электропривода при произвольном динамическом моменте	29
Глава 3. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВИГАТЕЛЕМ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	30
3.1. Электромеханические свойства ДПТ НВ.....	30
3.2. Способы параметрического регулирования скорости ДПТ НВ	33
3.3. Расчет регулировочных сопротивлений в цепи якоря ДПТ НВ	38
3.4. Ограничение тока и момента при пуске ДПТ НВ	41
3.5. Способы торможения ДПТ НВ	44
Глава 4. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	49
4.1. Электромеханические свойства ДПТ ПВ.....	49

4.2. Регулирование координат электропривода на базе ДПТ ПВ.....	51
4.3. Тормозные режимы электропривода с ДПТ ПВ.....	56
4.4. Электропривод с двигателями смешанного возбуждения	59
Глава 5. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО СИСТЕМЕ УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ	60
5.1. Электропривод по системе генератор – двигатель (Г–Д)	60
5.2. Электропривод по системе тиристорный преобразователь – двигатель	63
5.3. Электропривод с широтно-импульсным регулированием.....	70
Глава 6. ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	75
6.1. Электромеханические и механические характеристики АД.....	75
6.2. Упрощенные выражения механической характеристики	79
6.3. Регулирование координат АД с помощью резисторов ...	80
6.4. Расчет добавочных резисторов в цепи ротора	83
6.5. Регулирование координат электропривода с АД изменением напряжения	85
6.6. Частотное регулирование скорости АД	88
6.7. Регулирование скорости изменением числа пар полюсов	92
6.8. Тормозные режимы АД.....	94
6.9. Асинхронно-вентильный каскад	99
Глава 7. СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.....	104
7.1. Общие сведения	104
7.2. Механическая характеристика СД.....	106
7.3. Угловая характеристика СД	106
7.4. Режимы работы СД	109
7.5. Возбуждение СД.....	112
7.6. Частотное регулирование скорости СД.....	114
7.7. Синхронный привод на базе двухмашинного агрегата	116

7.8. Угловая характеристика ДА	119
Глава 8. ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	120
8.1. Основные понятия	120
8.2. Классификация замкнутых систем регулирования	122
8.3. Система управляемый преобразователь – двигатель, замкнутая по скорости	124
8.4. Система УП–Д с нелинейной обратной связью по моменту	127
8.5. Система, замкнутая по положению	128
8.6. Понятие о системах подчиненного регулирования	131
Глава 9. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВО- ДАМИ	132
9.1. Принципы управления, используемые в релейно- контакторных схемах управления	132
9.2. Защита в системах электропривода	133
9.3. Выбор силовых аппаратов управления	135
9.4. Типовые схемы управления асинхронными электро- приводами	135
Глава 10. ВЫБОР ТИПА И МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ	141
10.1. Выбор типа двигателя	141
10.2. Расчет электродвигателя на нагрев	143
10.3. Нагрузочная диаграмма и тахограмма	147
10.4. Классификация номинальных режимов работы двигателя	148
10.5. Выбор двигателя по мощности в режиме S1	149
10.6. Выбор двигателя по мощности в режиме S2	150
10.7. Выбор двигателя по мощности в режиме S3	151
10.8. Выбор резисторов в силовых цепях двигателей	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	154

Учебное издание

ТРЕФИЛОВ Владимир Алексеевич

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Учебное пособие

Редактор и корректор *Н.В. Бабинова*

Подписано в печать 20.10.07. Формат 60×90/16.

Набор компьютерный. Усл. печ. л. 9,875.

Тираж 150 экз. Заказ № 166.

Издательство

Пермского государственного технического университета.

Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.

Тел. (342) 2–198–033.